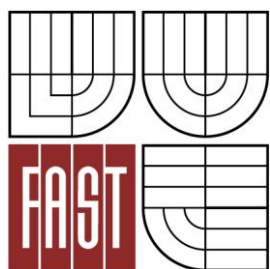




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# VÝPOČET ÚNOSNOSTI A DEFORMACÍ SILNIČNÍHO MOSTU A POROVNÁNÍ S NAMĚŘENÝMI HODNOTAMI

CALCULATION OF BEARING CAPACITY AND DEFORMATION OF A ROAD BRIDGE AND COMPARISON  
WITH MEASURED VALUES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

HYNEK ŠTEKBAUER

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR ŠAFÁŘ, CSc.

BRNO 2013



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavební mechaniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Hynek Štekbauer
<b>Název</b>	Výpočet únosnosti a deformací silničního mostu a porovnání s naměřenými hodnotami
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Petr Šafář, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2012
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	24. 5. 2013
V Brně dne 30. 11. 2012	

.....  
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

ČSN 73 2030 (732030) - Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí

ČSN 73 6209 (736209) - Zatěžovací zkoušky mostů

## **Zásady pro vypracování**

1. Seznámení se s metodikou měření deformací mostů.
2. Provedení měření deformací (nejméně 2 mostů).
3. Sestavení statického modelu pro výpočet MKP (ANSYS, SCIA,...).
4. Porovnání výsledků měření a teoretického výpočtu, zdůvodnění případných rozdílů.

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Petr Šafář, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Náplní této práce je naměření deformací silničního mostu při přejezdu soupravy s nadměrným nákladem, sestavení modelu pro výpočet a následné porovnání naměřených hodnot svislé deformace s teoretickými výpočty. Určení kritických míst při sestavování modelu a vyhodnocování výsledků.

## **Klíčová slova**

Most, ANSYS, Scia Engineer, ortotropní deska, metoda konečných prvků.

## **Abstract**

This work consists of deformation measurement of a road bridge during crossing of excessive load, model formation for calculation and comparison between measured vertical deformation values and theoretical calculations. Designation of critical issues during model formation and result interpretation.

## **Keywords**

Bridge, ANSYS, Scia Engineer, orthotropic slab, finite element method.

### **Bibliografická citace VŠKP**

ŠTEKBAUER, Hynek. *Výpočet únosnosti a deformací silničního mostu a porovnání s naměřenými hodnotami*. Brno, 2013. 60 s., 25 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Šafář, CSc..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.5.2013

.....  
podpis autora  
Hynek Štekbauer

### **Poděkování:**

Děkuji hlavně svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Šafářovi, CSc. za ochotu, rady a čas věnovaný při konzultacích. Také chci poděkovat Ing. Igorovi Suzovi za možnost zúčastnit se a provádět měření mostů, a pomoc při zajišťování podkladů k mostním konstrukcím, dále chci poděkovat Ing. Filipu Hustému za poskytnutí podkladů k prvnímu mostu a Ing. Jackovi Wendrinskemu, Ph.D. za poskytnutí kompletní projektové dokumentace k druhému mostu, Ing. Aleši Nevařilovi, Ph.D. za rady k modelování v Ansysu a Ing. Radimu Nečasovi, Ph.D. za sdílení svých zkušeností s betonovými mosty.

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2. LINEÁRNÍ STATICKÁ ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>3. METODIKA MĚŘENÍ.....</b>	<b>17</b>
3.1. ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ DEFORMACÍ MOSTŮ .....	17
3.2. POTENCIOMETRICKÉ MĚŘENÍ DEFORMACÍ.....	19
<b>4. MOST A.....</b>	<b>21</b>
4.1. POPIS PRVNÍHO MOSTU .....	21
4.2. SPECIFIKACE NADMĚRNÉHO NÁKLADU .....	23
4.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	25
4.4. MODELOVÁNÍ MOSTU A A VÝPOČTOVÉ HODNOTY .....	26
4.4.1. <i>Model 1</i> .....	26
4.4.2. <i>Použité prvky</i> .....	28
4.4.2.1. BEAM189 .....	28
4.4.2.2. SHELL281 .....	29
4.4.2.3. SOLID186 .....	30
4.4.2.4. MPC184 .....	31
4.4.3. <i>Model 2</i> .....	32
4.4.4. <i>Model 3</i> .....	36
4.4.5. <i>Model 4</i> .....	38
<b>5. MOST B .....</b>	<b>43</b>
5.1. POPIS DRUHÉHO MOSTU .....	43
5.2. SPECIFIKACE NADMĚRNÉHO NÁKLADU .....	44
5.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	46
5.4. MODELOVÁNÍ MOSTU B A VÝPOČTOVÉ HODNOTY .....	47
5.4.1. <i>Model 1</i> .....	47
5.4.2. <i>Model 2</i> .....	52
<b>6. ZÁVĚR .....</b>	<b>55</b>
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	56
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	58
SEZNAM TABULEK .....	59



SEZNAM GRAFŮ .....	59
SEZNAM PŘÍLOH .....	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	60

## 1. ÚVOD

Při navrhování dopravních staveb je potřeba kromě obvyklého zatížení, tj. zatížení běžnou dopravou a klimatickými vlivy, uvažovat i se zatíženími mimořádnými. Mezi ně patří zejména zatížení při přepravě nadměrných nákladů, které se čas od času vyskytnou.

V těchto případech, kdy je potřeba pečlivě naplánovat trasu s ohledem na únosnost komunikací a zejména mostních staveb, je nutno při průjezdu takovýchto zatížení provést měření deformací mostních konstrukcí pro posouzení, zda byly splněny předpoklady o vhodnosti zvolené trasy a zda případně nedošlo v krajním případě k narušení mostní konstrukce. U starších mostů pak naměřené deformace mohou posloužit i jako indikátor technického stavu těchto konstrukcí.

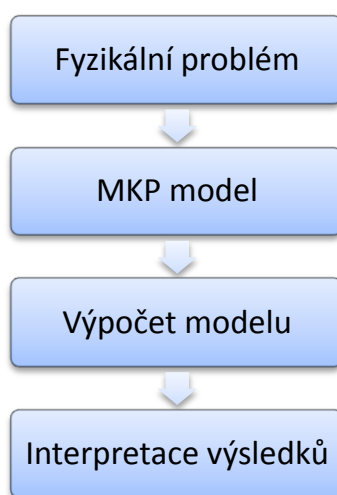
Tato bakalářská práce si stanovila za cíl provést (zúčastnit se) měření deformací u 2 typově i rozměrově zcela odlišných mostních konstrukcí. Následně na základě dostupných podkladů sestavit odpovídající výpočtové modely konstrukcí a určit hodnoty deformací v měřených bodech.

Vypočtené hodnoty deformací se následně porovnávají s naměřenými hodnotami a posuzuje se jejich shoda, popř. rozdílnost a zjišťuje se důvod těchto rozdílů.

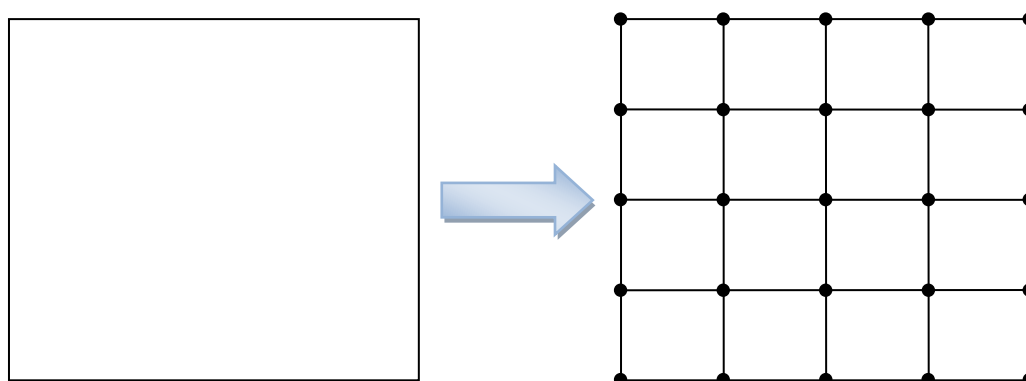
## 2. LINEÁRNÍ STATICKÁ ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je široce používanou metodou ve stavebnictví, strojírenství, biomechanice, elektrotechnice, etc. Nachází uplatnění v lineárních, nelineárních, statických i dynamických analýzách. Tato metoda je dnes používána v řadě výpočetních programů.

### Proces výpočtu MKP [1]



MKP spočívá v idealizaci soustavy (rozdělení konstrukce na prvky).



Obr. 1 - Diskretizace soustavy na jednotlivé konečné prvky

Sestavení podmínek rovnováhy pomocí stavových proměnných. Sestavení soustavy rovnic spojených prvků pro určení hledaných proměnných. Vyřešení rovnic za využití rovnováhy na prvku [1].

Všeobecně máme 15 neznámých, jsou to:

3 posuvy	$u, v, w$
6 přetvoření	$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$
6 napětí	$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$

dále 15 rovnic:

- 6 geometrických
- 6 fyzikálních
- 3 rovnice rovnováhy

Po zavedení okrajových podmínek rovnováhy je možné úlohu řešit. Podle výběru nezávislých neznámých pak hovoříme o přístupu deformačním, silovém a kombinací obou o smíšeném[2].

V deformační variantě MKP se vychází z Lagrangeova variačního principu minima celkové potenciální energie soustavy. Hledáme minimum potenciální energie  $\Pi$

$$\Pi = W - P \quad (1)$$

kde  $W$  je energie napjatosti tělesa  
 $P$  je energie vnějšího zatížení

Rovnice v metodě konečných prvků lze získat derivací podle jednotlivých parametrů

$$\frac{d\Pi}{du} = \mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{F} = 0 \quad (2)$$

kde je  $\mathbf{K}$  vlastnost  
 $\mathbf{u}$  chování  
 $\mathbf{F}$  akce

Soustava rovnic vede při statické analýze k výrazu

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (3)$$

řádky soustavy (3) představují rovnice rovnováhy v jednotlivých uzlových bodech sítě. Rovnici (3) můžeme vyjádřit ve tvaru

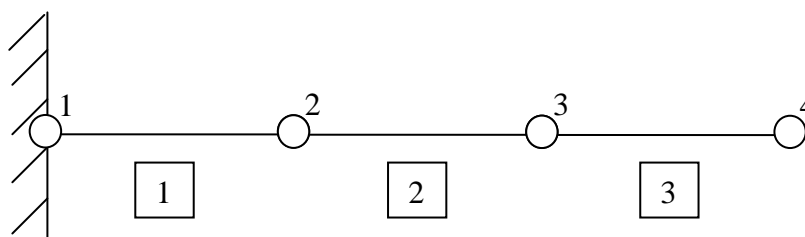
$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F}. \quad (4)$$

Rovnice (3) se převádí na tvar (4) z toho důvodu, že  $\mathbf{u}$  je neznámá. Konkrétní příklady neznámé proměnné jsou uvedeny v tabulce. Nás se týká první řádek této tabulky.

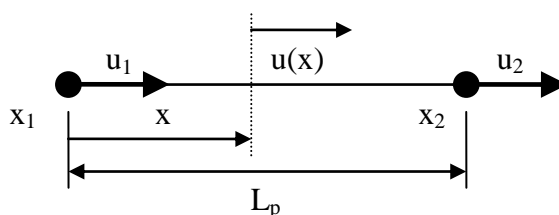
**Tabulka 1 - Popis rovnic (3) a (4) [3]**

	Vlastnost [K]	Chování {u}	Akce {F}
Elastická	tuhost	posun	síla
Termální	vodivost	teplota	zdroj tepla
Kapalinná	viskozita	rychlost	síla tělesa
Elektrostatická	propustnost	elektrický potenciál	náboj

Matice tuhosti příhradového prutu



Obr. 2 - Diskretizace prutu [3]



Obr. 3 - Osově namáhaný prutový prvek [3]

Jedná se o nejjednodušší funkci aproximující posunutí prvku

$$u(x) = N_1 u_1 + N_2 u_2 \quad (5)$$

kde  $N$  jsou přípustné tvarové funkce, které musí vyhovět okrajovým podmínkám i vztahu (6).

$$u(x) = c_1 + c_2 \frac{x}{L} \quad (6)$$

$$N_1 = 1 - \frac{x}{L}, \quad N_2 = \frac{x}{L}, \quad (7)$$

$$u(x) = (1 - \frac{x}{L})u_1 + \frac{x}{L}u_2, \quad (8)$$

dále platí

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L EA(u'(x))^2 dx, \quad (9)$$

po dosazení (8) do (9) a úpravě platí

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 k_{ij} u_i u_j, \text{ kde } k_{ij} = \int_0^L EA N_i' N_j' dx, \quad (10)$$

$$\mathbf{K}^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

matice tuhosti celé konstrukce je dána součtem dílčích matic každého prvku  $\mathbf{K}^e$

$$\mathbf{K} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Vektor zatížení lze určit obdobným způsobem pomocí výrazu

$$P_i = \int_0^L p(x) N_i dx. \quad (13)$$

Uvedený příklad je proveden za použití báзовých funkcí, nyní odvození pomocí aproximace tvarové funkce polynomem.

$$u(x) = a_0 + a_1 x = \{1 \ x\} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \mathbf{P} \mathbf{a} \quad (14)$$

Funkce  $u(x)$  platí pro všechny body střednice.

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{S} \mathbf{a} = \mathbf{u}_e \quad (16)$$


$$\mathbf{a} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{u}_e \quad (17)$$

Dosadíme (17) do (14) a získáme

$$u(x) = \mathbf{P} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{u}_e, \quad (18)$$

$$\varepsilon_x = \frac{du(x)}{dx} = \{0 \ 1\} \mathbf{S}^{-1} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \left\{ -\frac{1}{L} \quad \frac{1}{L} \right\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{L} \{-1 \quad 1\} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}, \quad (19)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_x^T E \varepsilon_x A dx = \frac{1}{2} \{u_1 \quad u_2\} \frac{EA}{L^2} \int_{x_1}^{x_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}. \quad (20)$$

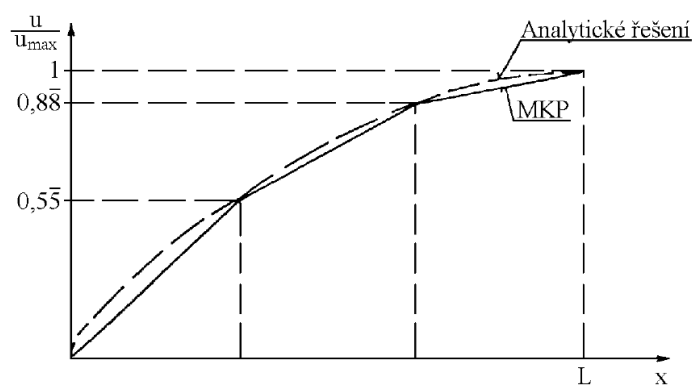
  
 $\mathbf{K}^e$  - matice tuhosti prvku v lokální soustavě souřadnic

Po integraci

$$\mathbf{K}^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

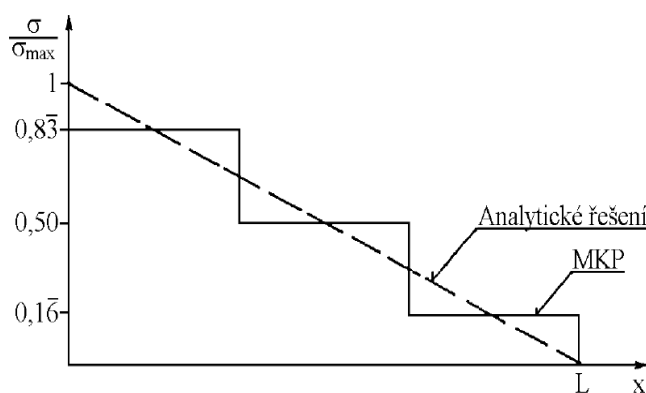
Rovnice (11) a (21) jsou identické, takže jsme dosáhli stejné matice tuhosti prvku, a tím i stejné matice tuhosti konstrukce.

Výpočtem (3) získáme posuny všech uzlových bodů jako primární neznámou veličinu. Z těchto posunů lze pomocí (19) určit přetvoření a z něj napětí. Při reprezentaci výsledků musíme brát zřetel na přesnost řešení.



Obr. 4 - Srovnání numerického a analytického řešení prutu - posun [3]

V uzlech se numerické výsledky shodují s analytickými, to neplatí všeobecně. Obr. 5 srovnává průběh numerického a analytického výpočtu napětí.



Obr. 5 - Srovnání numerického a analytického řešení prutu - napětí [3]



Výhody metody konečných prvků [4]:

1. Postup výpočtu je nezávislý na tvaru řešení oblasti; závisí pouze na tvaru prvku a lze tak řešit libovolnou oblast složenou z prvků a to včetně otvorů a zářezů.
2. Soustava algebraických lineárních rovnic pro neznámé veličiny (parametry deformace oblasti) má matici součinitelů výrazně pásovou.
3. Libovolné okrajové podmínky lze v metodě konečných prvků snadno vyjádřit. Stejně tak lze snadno vystihnout správný průběh řešení v místech koncentrace vnějších a vnitřních sil, zhuštěním prvků v těchto místech.
4. Metoda konverguje ke správnému řešení. Řád konvergence je výrazně vyšší než v klasických variačních metodách.

Pro tuto kapitolu bylo čerpáno z materiálů [1], [2], [3], [4], [5].

### 3. METODIKA MĚŘENÍ

Rozsah a způsob měření deformací mostů se volí podle druhu a dostupnosti jednotlivých částí konstrukce. Respektují se přitom požadavky objednatele, nejčastěji správce. Výsledky měření při přejezdu nadměrného nákladu přes most jsou jedním z indikátorů stávajícího stavu konstrukce a při správné interpretaci mohou upozornit na případné poruchy konstrukce [6].

Měření deformací mostů se provádí zpravidla v kritických místech, což jsou většinou body s předpokládanou největší deformací. Bodem měření ovšem mohou být i jiné významné body, například opěry mostu (z důvodu jejich případného zatlačení), ložiska (jejich pootočení), rozevírání a zavírání trhlin, etc.

#### 3.1. Základní metody měření deformací mostů

Deformace nosné konstrukce lze stanovit z horní nebo spodní strany nosné konstrukce.

Při měření deformací z horního líce nosné konstrukce se používají převážně optické metody, nejčastěji geodetické a laserové. Přístroj se umísťuje mimo konstrukci. V měřeném místě se instaluje měřicí značka. Některá geodetická nebo laserová zařízení umožňují připojení záznamového zařízení. Optické metody se nejčastěji využívají u měření přes elektrifikované tratě nebo přes prudké a hluboké řeky. K jejich výhodám patří rychlost aplikace a nezávislost na podmínkách pod mostem. K nevýhodám patří přesnost měření snižující se s rostoucí délkou záměry. V případě umístění přístroje na mezilehlou podpěru je navíc nutné zohlednit i naklonění konstrukce během přejezdu [6].

Průhyboměry se používají především k měření ze spodního líce nosné konstrukce. Ke spodnímu líci se upevňuje měřicí drát, který se spouští k zemi. Běžně se používají dráty ocelové, v odůvodněných případech dráty invarové (při dlouhodobějším sledování, z důvodu změny teplot). Měřicí drát (závěs) se na spodním konci opatří závažím. Průhyboměry mají míru přesnosti měření běžně v desetinách milimetru, ale lze použít i zařízení výrazně přesnější.

Elektrické snímače deformací (potenciometry a tenzometry) se řadí ke klasickým průhyboměrům. Navíc jsou ovšem připojeny k měřicí ústředně a PC, což umožňuje měření mnohokrát za sekundu a paralelní záznam z více snímačů. Přesnost měření je dána volbou a rozsahem zařízení. Čím menší je rozsah měření, tím vyšší zpravidla bývá přesnost. Indukční měřicí přístroje s rozsahem 1 mm měří s přesností 0,001 mm. Frekvence záznamu se běžně volí 10 až 20 krát za sekundu. Při zjišťování orientační dynamické odezvy lze měřit i 100 krát za sekundu. Skutečné dynamické měření se provádí pomocí akcelerometrů, instalovaných v přesně vypočtených místech (uzlech).

Měření provedené pomocí tenzometrických snímačů je velmi přesné, jejich instalace je ovšem poměrně náročná a pro běžné měření se nevyužívají. S využitím těchto snímačů lze měřit nejen průhyby konstrukcí, ale také změny šířek trhlin (řádově v tisících milimetru). Dále se užívají k určení silových veličin za pomoci převodních vztahů, a to i u dodatečně podpíraných konstrukcí [6].

### 3.2. Potenciometrické měření deformací

Měření svislých deformací nosných konstrukcí mostu při přejezdu nadměrného nákladu lze měřit více způsoby: potenciometricky, indukčně, opticky, pomocí GPS, etc. Některé z nich jsou popsány v podkapitole 3.1. Pro námi provedené měření byly použity potenciometrické snímače.

V těchto snímačích dochází ke změně odporu, které je dosaženo změnou délky odporové dráhy. Působením měřené veličiny se mění poloha kontaktu (běžce) na odporové dráze a tato změna se převádí na změnu napětí nebo proudu [7]. Pro odpor  $R$  platí:

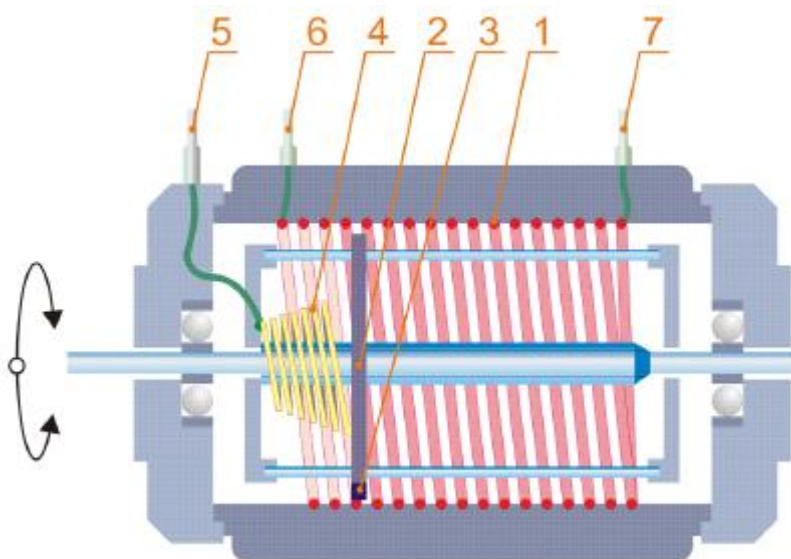
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (22)$$

a tedy

$$\Delta R = \frac{\rho \cdot \Delta l}{S}, \quad (23)$$

kde je $\rho$	odpor materiálu vodiče
$l$	délka vodiče, na kterém se měří odpor
$\Delta l$	změna polohy běžce
$S$	plocha průřezu vodiče

Z výše uvedeného vzorce vyplývá závislost mezi změnou posunu a změnou odporu. V námi provedeném měření bylo použito lineárního výstupu signálu.



Obr. 6 - Konstrukční schéma víceotáčkového potenciometru [7]

1 – odporové vinutí, 2 – běžec s pohyblivým kontaktem, 3 – pohyblivý kontakt, 4 – vodivá pružina  
 ,5 – výstup z pohyblivého kontaktu, 6 začátek odporové dráhy, 7 – konec odporové dráhy

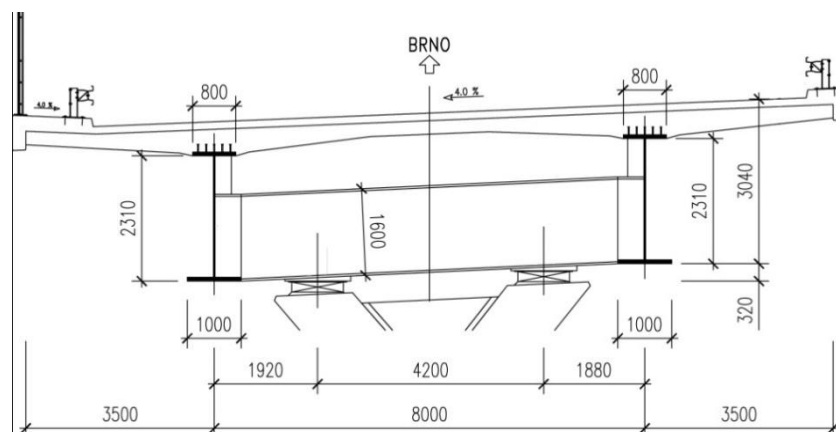


Obr. 7 - Trojnožka s potenciometrem [8]

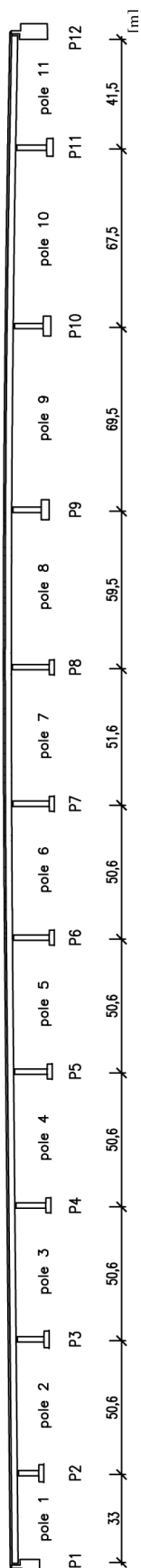
## 4. MOST A

### 4.1. Popis prvního mostu

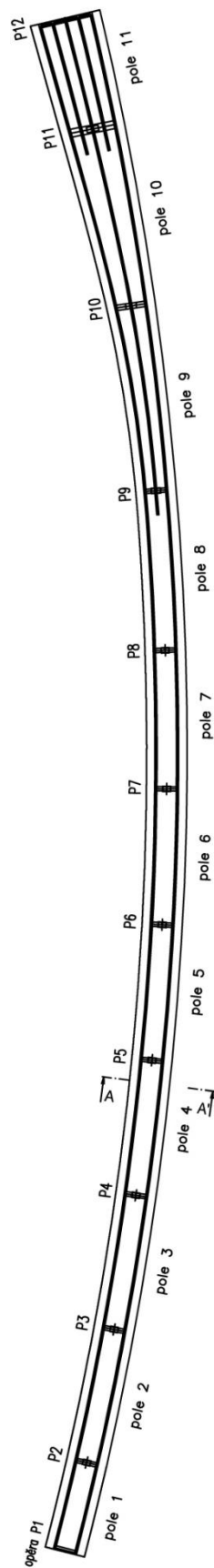
První modelovanou konstrukcí je spojitý dálniční most na dálnici D1 v Ostravě o 11 polích s rozpětím od 33 do 70 m. Celková délka mostu je přes 580 m. Most se nachází v půdorysném oblouku. Nosná konstrukce je na podpěrách uložená nepřímo, pomocí nadpodporových příčníků uložených na hrncových ložiscích. Konstrukci tvoří dvojice svařovaných I nosníků proměnné výšky z oceli S355 se spřaženou železobetonovou, příčně předepnutou mostovkovou deskou z betonu C30/37. Počet nosníků se v 8. poli zvyšuje na tři a v 11. poli na pět nosníků z důvodu umístění dálničního nájezdu. Mostovka je proměnné výšky 0,25 - 0,45 m a jsou na ni osazeny římsy, které jsou rozdilátovány spárami na krátké úseky, aby nedocházelo ke spolupůsobení římsy s nosnou konstrukcí. Tento viadukt převádí komunikaci pouze v jednom směru.



Obr. 8 - Příčný řez A-A'



Obr. 9 - Podélný řez Mostem A



Obr. 10 - Půdorys Mostu A

## 4.2. Specifikace nadměrného nákladu

Nadměrným nákladem je transformátor o hmotnosti 96 tun, který byl převážen na modulárním podvozku Goldhofer (61,1 tun), za pomoci tahače Scania (12,9 tun) a postrku Mercedes-benz (35 tun). Trasa vedla po dálnici D1 ze směru Bohumín ve směru na Prahu. Přeprava se uskutečnila v letních měsících roku 2012.

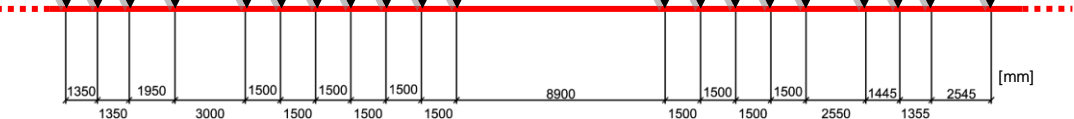
Souhrn:

Náklad:	96,00 t
Podvozek:	61,60 t
Tahač:	12,90 t
Postrk:	35,00 t
<hr/>	
Celkem:	205,50 t

Souprava:

- zatížení jednotlivých náprav [t]:  
 $7,0 + 7,0 + 9,22 + 9,22 + 12 \times 11,505 + 7,55 + 7,55 + 9,95 + 9,95$
- rozvor náprav [m]:  
 $2,545 - 1,355 - 1,445 - 2,550 - 4 \times 1,500 - 8,900 - 6 \times 1,500 - 3,00 - 1,95 - 2 \times 1,35$





Obr. 11 - Schéma zatížení v podélném řezu



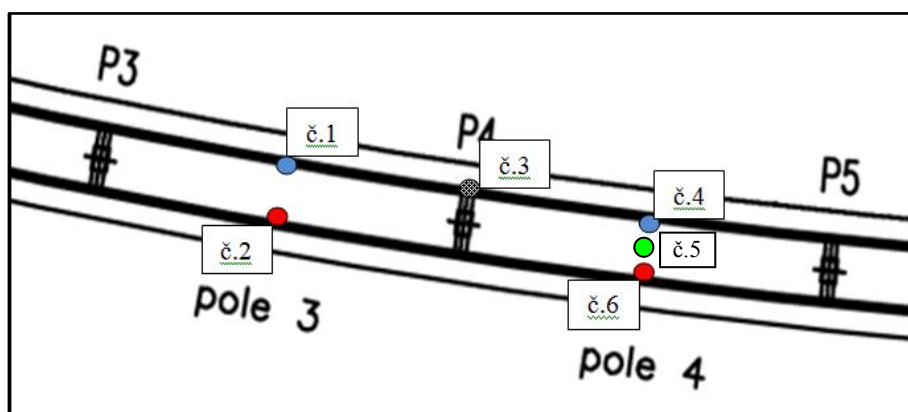
Obr. 12 - Schéma zatížení v půdorysu



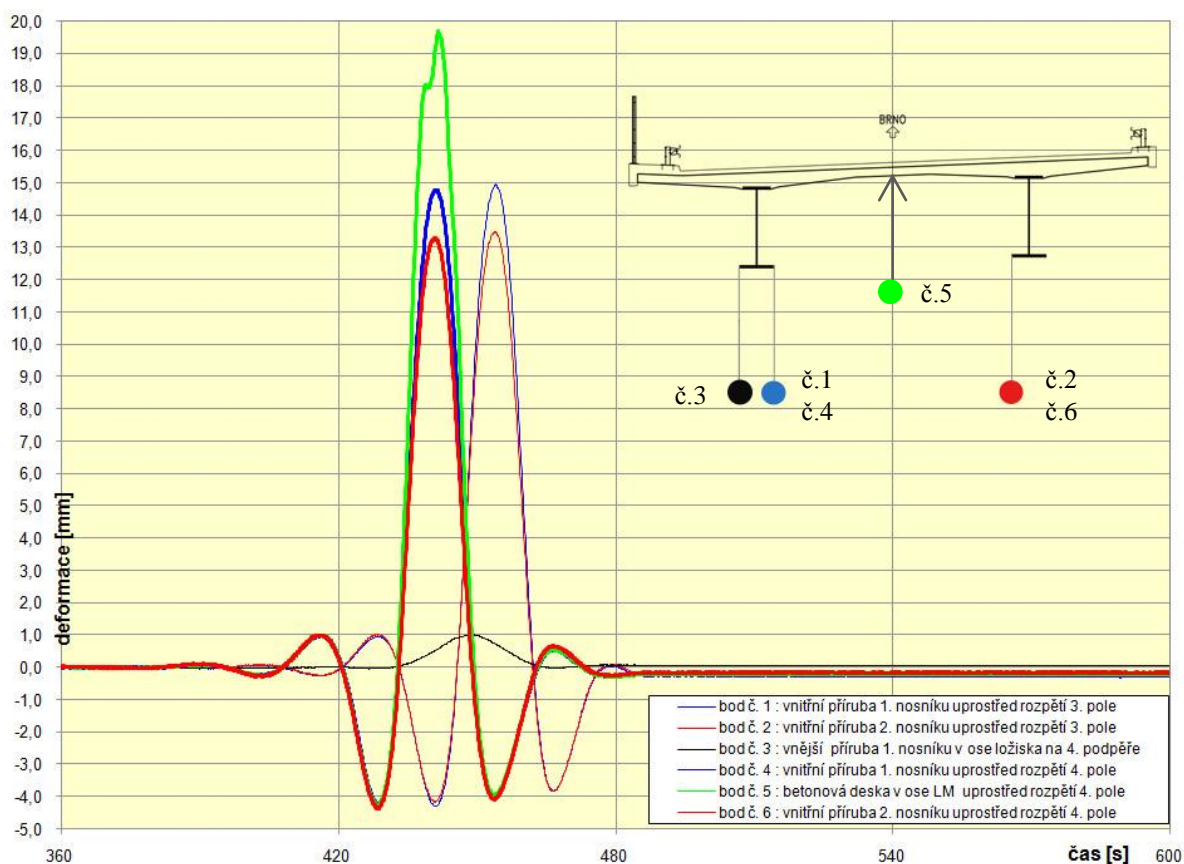
Obr. 13 - Fotodokumentace přejezdu

### 4.3. Výsledky měření

Měření bylo provedeno pomocí potenciometrů v místech předpokládané maximální svislé deformace, s ohledem na dostupnost a bezpečnost. Místem měření bylo z důvodu výskytu vodních ploch, silničních a železničních dopravních cest pod mostem zvoleno 3. a 4. pole mostu.



Obr. 14 - Body měření v půdorysu



Graf 1 - Výsledky měření na Mostu A

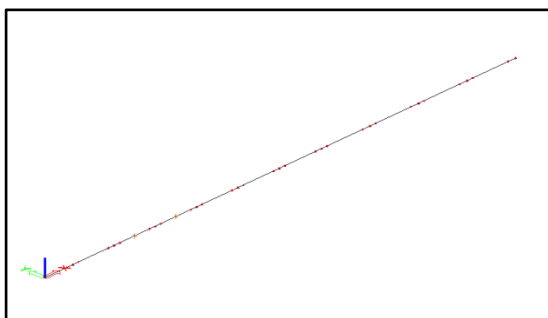
Bod číslo 5 nebude uvažován, z důvodu nezjištěné anomálie v měření (viz. Graf 1).

#### 4.4. Modelování Mostu A a výpočtové hodnoty

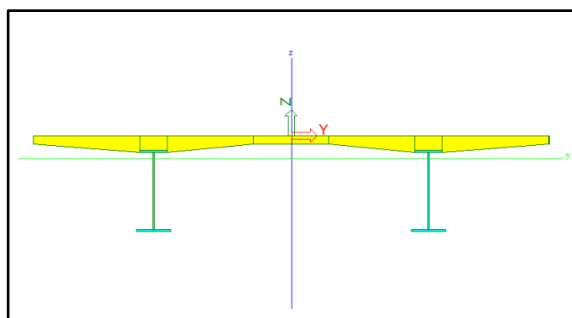
Model konstrukce byl proveden v několika programech a bude zde popsán jeho postupný vývoj. Jako zatížení bude převážně použita ta poloha zatížení, která vyvodí maximální svislé deformace v 3. poli. Tato poloha byla vyhodnocena jako rozhodující pomocí programu Scia Engineer 2012.0, kde se konstrukce namodelovaná jako spojitý prut zatížila pohyblivým zatížením (viz. Obr. 17). Ostatní polohy zatížení budou brány v úvahu až v případě dostatečného přiblížení se naměřeným hodnotám.

##### 4.4.1. Model 1

Pro předběžnou kontrolu geometrie modelu, včetně materiálových vlastností, byla jako první krok konstrukce namodelována v programu Scia Engineer 2012.0. Důvodem bylo rychlé a relativně jednoduché zadávání pomocí integrovaných funkcí programu, a to jak mostních průřezů, tak pohyblivého zatížení pro výpočet kritické polohy zatížení. Zadání proběhlo pomocí 1D prutů, v rámci zjednodušení bylo zanedbáno půdorysné zakřivení i příčný sklon mostovky. Pro výpočet průřezových charakteristik bylo počítáno pouze s mostovkou a ocelovými I nosníky.



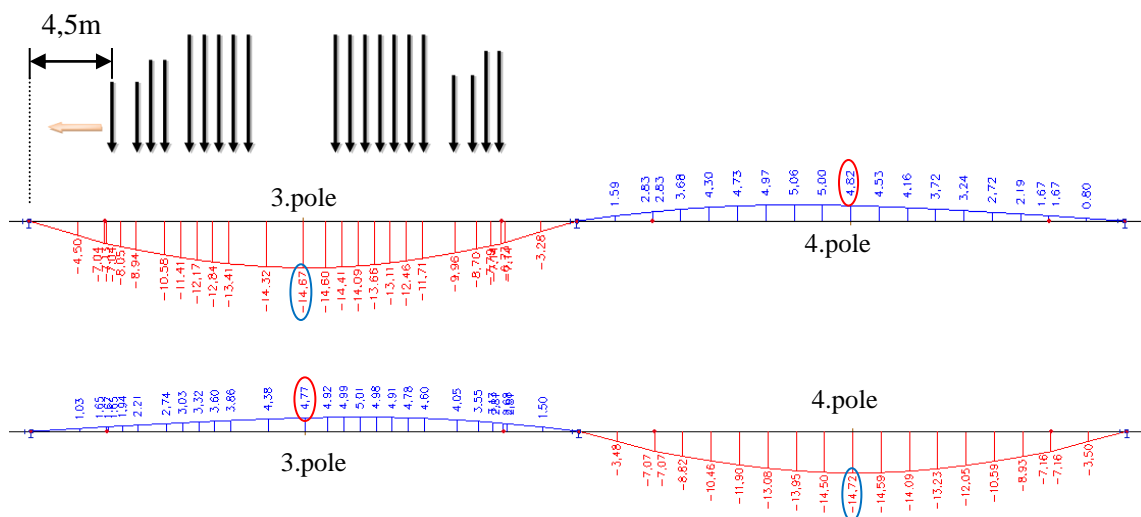
Obr. 15 - 1D spojitý nosník



Obr. 16 - Použitý průřez

Síly od jednotlivých náprav byly zadávány do těžiště průřezu, přičemž byla zanedbána jejich excentrická poloha v příčném směru.

Jako výstup z programu byly zvoleny deformace  $u_z$  při kritické poloze zatížení pro měřené body v 3. a 4. poli:



Obr. 17 - Poloha zatížení a výsledky Modelu 1

## Výsledky

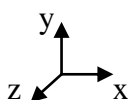
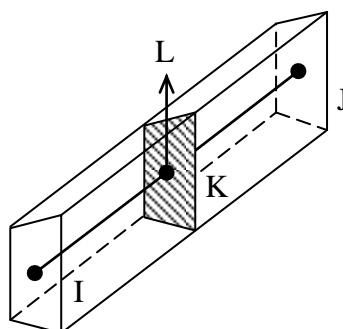
Tabulka 2 – Výsledky Modelu A1

	Průměrná naměřená deformace $u_z$ [mm]	Vypočítaná deformace $u_z$ [mm]	Rozdíl [%]
<b>průměr bodů 1 a 2</b>	14.22	14.67	<b>3.20</b>
<b>průměr bodů 4 a 6</b>	-4.04	-4.82	<b>19.41</b>

Tyto výsledky byly uspokojivé z pohledu relativně velké shody s naměřenými hodnotami. V dalším kroku bylo přikročeno k tvorbě složitějšího modelu v programu Ansys 14.0.

#### 4.4.2. Použité prvky

##### 4.4.2.1. BEAM189



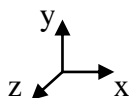
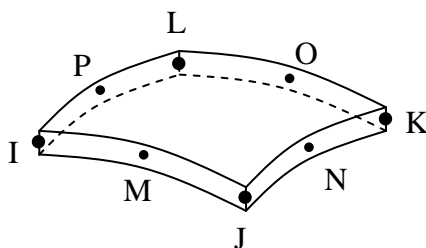
BEAM189 je prvek vhodný pro analýzu štíhlých až středně tlustých prutových konstrukcí. Prvek je založen na Timoshenkově teorii, která zahrnuje účinky smyku na deformaci průřezu. Prvek má 3 uzly a ve výchozím nastavení má v každém z nich 6 stupňů volnosti (volitelně je dostupný sedmý stupeň volnosti), jedná se o posuny ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a rotaci kolem těchto os [9].

Průřezové charakteristiky byly zadány přes geometrii příčného řezu, pomocí příkazů SECTYPE (zvolení typu průřezu), SECOFFSET (nastavení odsazení), SECDATA (zadání rozměrů).

#### Vstupní data

Uzly	I, J, K, L (uzel pro určení prostorové orientace průřezu L je volitelný)
Stupně volnosti	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ (volitelně také WARP)
Průřezové charakteristiky	pomocí příkazů SECTYPE, SECOFFSET, SECDATA
Materiálové charakteristiky	EX (modul pružnosti), PRXY (Poissonův součinitel), DENS (hustota)

## 4.4.2.2. SHELL281

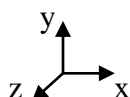
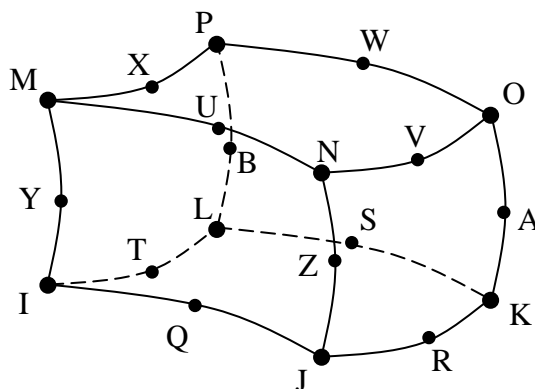


SHELL281 je prvek vhodný pro analýzu tenkých a středně tenkých skořepin. Jedná se o 8 uzlový prvek. V každém uzlu má 6 stupňů volnosti, a to posun ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a rotaci kolem těchto os. Volitelně lze vypustit rotační stupně volnosti pro použití prvku jako membrány [9].

## Vstupní data

Uzly	I, J, K, L, M, N, O, P
Stupně volnosti	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ (rotaci je možno vypustit v případě použití prvku pouze jako membrány)
Průřezové charakteristiky	pomocí příkazů SECT, SECOFFSET, SECDATA, SECCONTROL
Materiálové charakteristiky	EX (modul pružnosti), PRXY (Poissonův součinitel), DENS (hustota)

## 4.4.2.3. SOLID186



SOLID186 je 20 uzlový 3D prvek, s třemi stupni volnosti v každém uzlu. Jedná se o posun ve směru os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Prvek podporuje, mimo jiné, velká přetvoření a umožňuje modelovat jak homogenní strukturu materiálu, tak i materiál tvořený vrstvami [9].

Tento prvek je vhodný k modelování nepravidelných tvarů a může mít jakoukoliv prostorovou orientaci.

## Vstupní data

Uzly	I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B
Stupně volnosti	UX, UY, UZ
Průřezové charakteristiky	žádné
Materiálové charakteristiky	EX (modul pružnosti), PRXY (Poissonův součinitel), DENS (hustota)

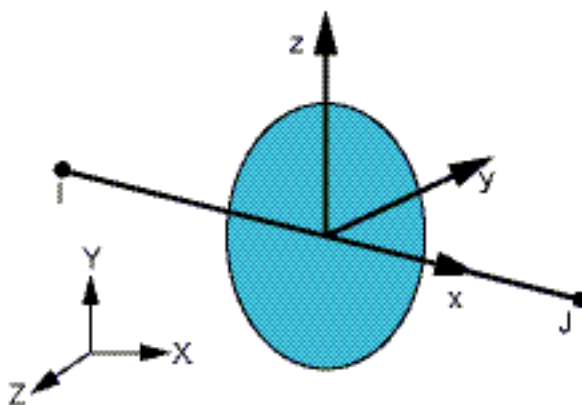
## 4.4.2.4. MPC184

MPC184 v sobě obsahuje vícero možností vícebodových vazeb prvků, které určují vazby mezi uzly. MPC184 se skládají z 2 podtříd, „vazebných prvků“ (tuhý prut, výsuvný prut, etc.) a „spojových prvků“ (různé druhy čepových spojů, kloubových spojů, kluzných spojů, etc.) [9].

Vstupní data

Uzly	I, J
Stupně volnosti	UX, UY, UZ, (volitelně ROTX, ROTY, ROTZ)
Průřezové charakteristiky	žádné
Materiálové charakteristiky	žádné - volitelně DENS (hustota) či při teplotní analýze koeficient teplotní roztažnosti

V našem případě bude používán prvek Rigid Beam. Jedná se o prvek „vazebný“ se všemi 6 stupni volnosti.



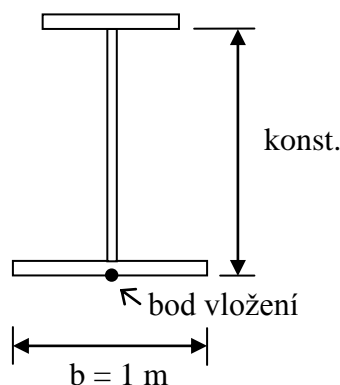
Obr. 18 - Prvek MPC184 Rigid Link/Beam [9]



#### 4.4.3. Model 2

V druhém modelu byla mostovka zastoupena skořepinou z prvků SHELL281 a její proměnná tloušťka byla nahrazena výškovými skoky. Její příčný sklon byl zanedbán. Ocelové I nosníky byly modelovány prvky BEAM189, stejně tak i příčníky. Při vkládání ploch a linií bylo využito možnosti importu z CAD systémů, jmenovitě z programu AutoCAD 2013.

Zadání jednotlivých I nosníků bylo provedeno (jak bylo později zjištěno ze statického hlediska nesprávně) přes osy spodních stran dolních pásnic I nosníků, a to z důvodu proměnných rozměrů I nosníků, kde se různě mění tloušťky stojin a pásnic. Konstantní zůstává pouze vzdálenost dolních stran pásnic.

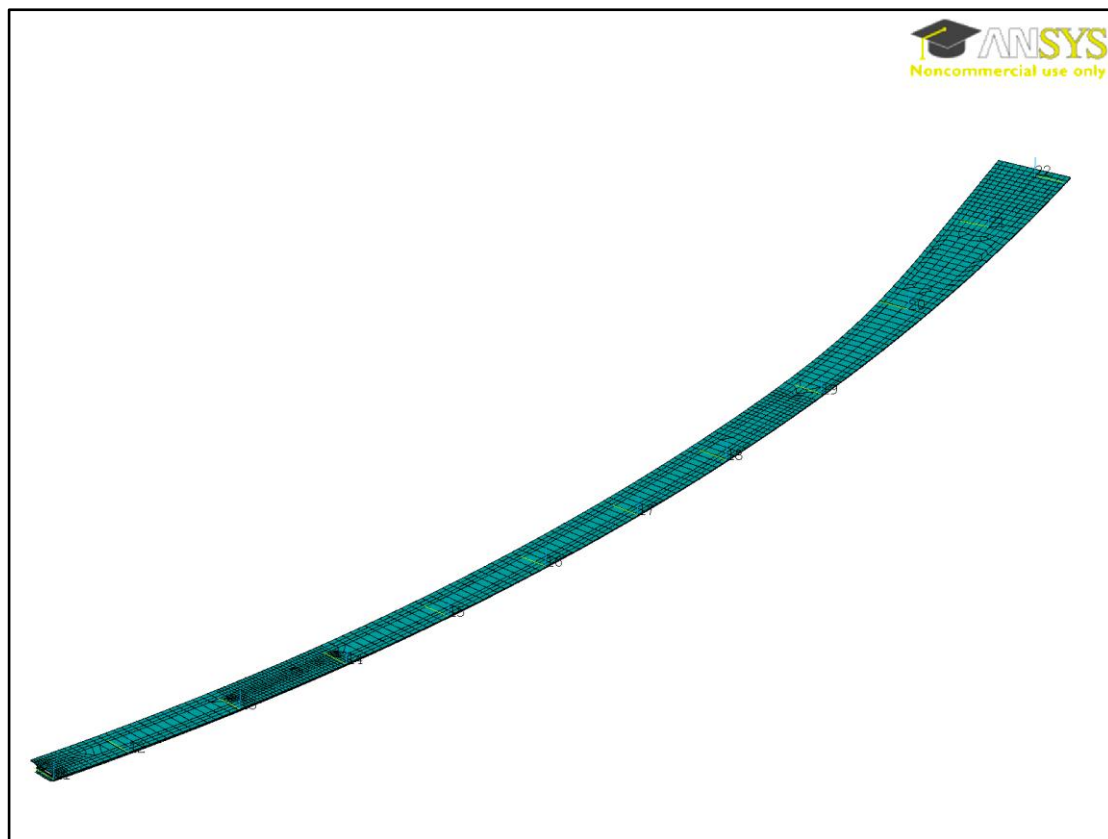


Obr. 19 - Zadávání nosníků přes osu spodní strany dolní pásnice

Po vložení hlavních nosníků byly stejně vloženy i příčníky. Horní mostovka byla namodelována z dílčích ploch a těm byly přisouzeny jednotlivé měnící se tloušťky. Podpory byly reprezentovány potlačením stupňů volnosti daným uzlům příčníku (dle projektové dokumentace).

Pro propojení mostovky s nosníky bylo použito příkazu COUPLING. Ten umožňuje svázání jednoho či více stupňů volnosti dvou a více uzlů. Spojeny byly vždy dva uzly nad sebou, uzel nosníku s uzlem mostovky.

Při reprezentování výsledků musí být brán zřetel na fakt, že výpočet svislé deformace proběhlo v ose dolní pásnice, a ne na jejím okraji, kde byla deformace reálně měřena.



Obr. 20 - Model 2

Výsledky v ose byly přepočteny pomocí výsledné rotace kolem osy vložení v každém bodě. Přepočet byl proveden pomocí vztahu:

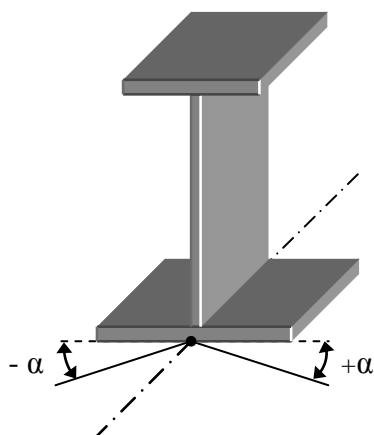
$$u_z = u_{z1} + \Delta u_z \quad (24)$$

$$\Delta u_z = \frac{b}{2} \cdot \sin(\pm\alpha) \quad (25)$$

$$\Delta u_z = 0,5 \cdot \sin(\pm\alpha) \quad (26)$$

Úhel  $\alpha$  je kladný pro body 1, 3 a 4 na 1. nosníku a záporný pro body 2 a 6 na 2. nosníku.

Proto rotace na 2. nosníku násobíme -1.



Obr. 21 - Rotace dolní pásnice

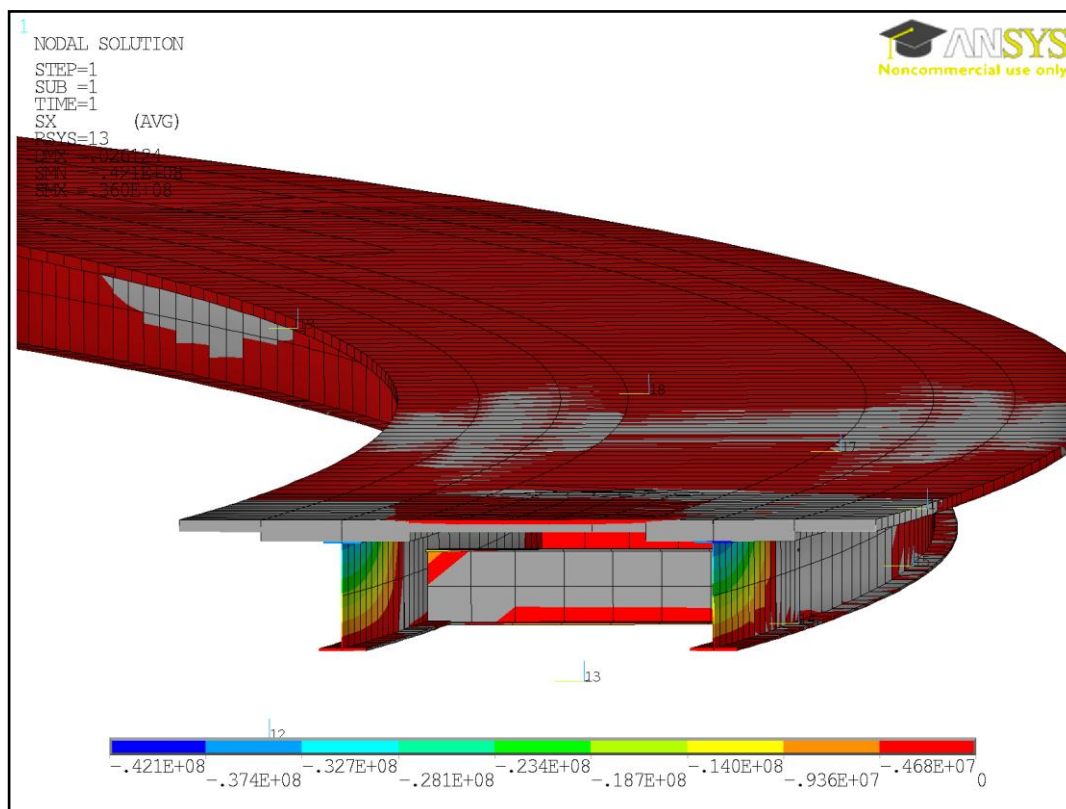
## Výsledky

**Tabulka 3 – Výsledky Modelu A2**

Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Rotace kolem osy [mrad]	uz1 [mm]	$\Delta uz$ [mm]	Vypočítaná deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	14.95	1.64	18.65	0.00	18.65	<b>24.77</b>
2	13.49	-1.44	19.09	0.00	19.09	<b>41.57</b>
3	0.73	0.000631	0.42	0.00	0.42	<b>-41.96</b>
4	-4.01	-0.05	-6.72	0.00	-6.72	<b>67.49</b>
6	-4.06	-0.06	-7.05	0.00	-7.05	<b>73.59</b>

Z tabulky 3 vyplývá, že rozdíl deformací v ose pásnice a na jejím okraji je zanedbatelný.

Při analýze výsledků byla zjištěna nesrovnalost v rozdělení tlaku po výšce nosníků. Uprostřed rozpětí v místě měřených bodů 1 a 2 byl totiž nosník tlačенý po celé své výšce.



Obr. 22 - Napětí  $\sigma_x$  po výšce průřezu v bodech 1 a 2

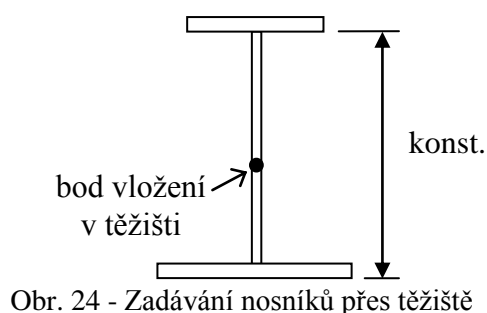
Tato chyba byla způsobena vkládáním nosníků přes osu dolní pásnice (Obr. 19). To způsobuje, že zatížení se přenáší přes tuto osu a průřez nosníku nad touto osou je tlačенý. Chyba je nejspíše způsobena i špatným užitím příkazu COUPLING. Tímto příkazem byly totiž přiřazeny stejné posuny i rotace uzlům nosníků a mostovky, které se nachází nad sebou, což ovšem vůbec neodpovídá skutečnému chování nosníku. Provázáním posunu i rotace bylo zabráněno přirozené deformaci prvků.

Dále již nebude používán příkaz COUPLING a bude nahrazen spojením za pomoci prvků MPC184.

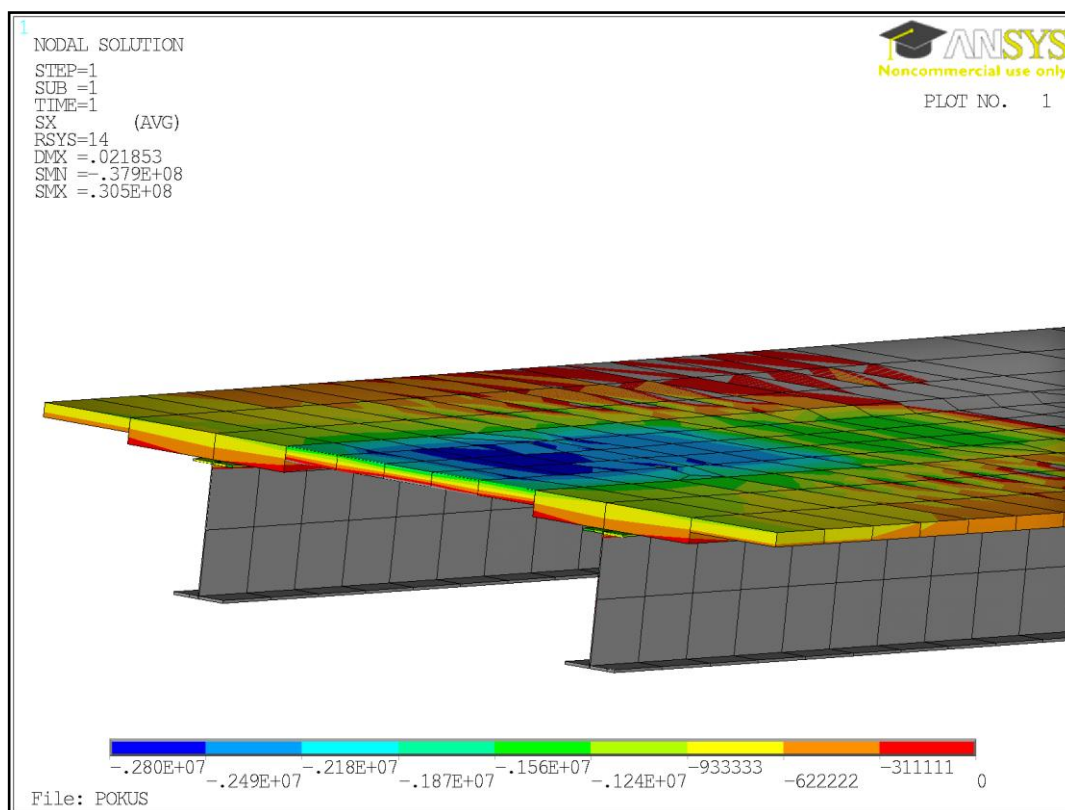
#### 4.4.4. Model 3

Ve třetím modelu byl z důvodu snahy o přiblížení se k naměřeným hodnotám změněn způsob zadávání ocelových I nosníků. Ty byly nyní vkládány jinak než u předchozího modelu, a to z důvodu odstranění nereálného rozdělení napětí po jejich výšce.

Vložení proběhlo přes těžiště nosníků. V místech změn průřezu nosníků byly konce těžištních os navazujících průřezů spojeny tuhými rameny vytvořených z prvků MPC184.



Obr. 24 - Zadávání nosníků přes těžiště



Obr. 23 - Napětí  $\sigma_x$  po výšce průřezu v bodech 1 a 2

Propojení nosníků s mostovkou bylo provedeno také z prvků MPC184.  
Tento model již dává rozumnější rozdělení napětí po průřezu.

## Výsledky

**Tabulka 4 – Výsledky Modelu A3**

Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Rotace kolem osy [mrad]	uz1 [mm]	$\Delta$ uz [mm]	Vypočítaná deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	14.95	2.66	14.26	1.33	15.59	<b>4.32</b>
2	13.49	-2.56	14.27	1.28	15.55	<b>5.82</b>
3	0.731	-0.156	0.61	0.08	0.69	<b>-16.55</b>
4	-4.01	-0.0013	-4.75	0.00	-4.75	<b>18.45</b>
6	-4.06	-0.0114	-4.70	0.01	-4.69	<b>15.68</b>

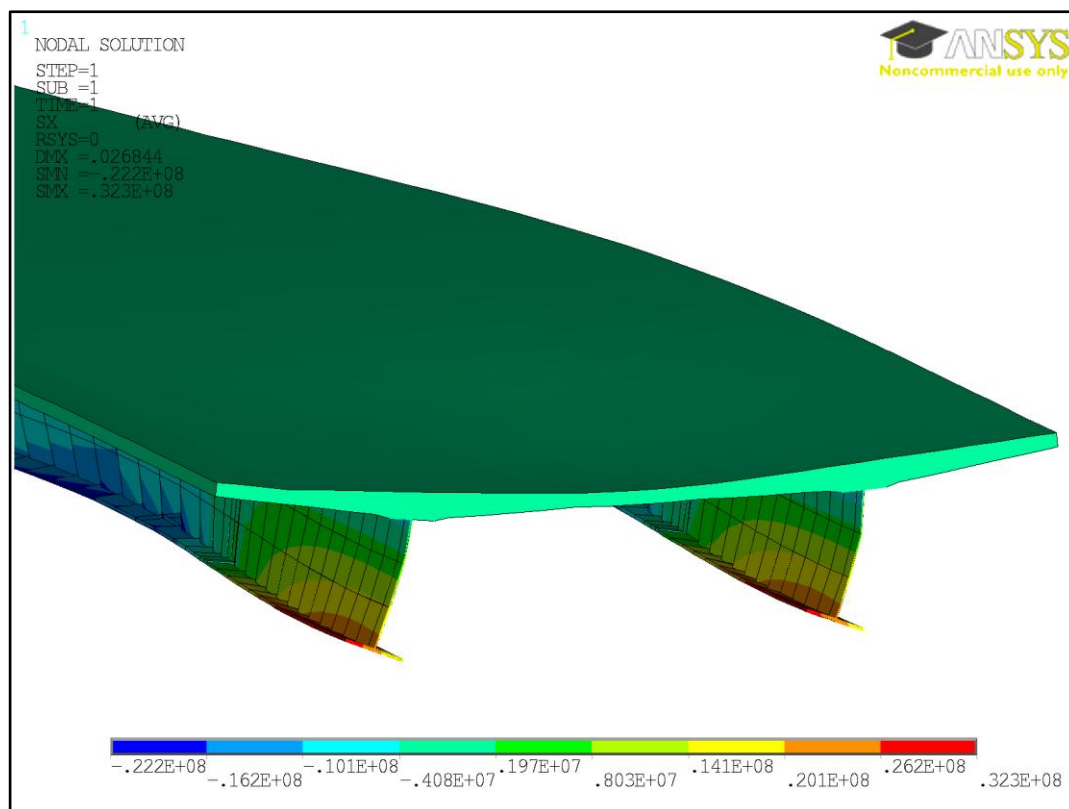
#### **4.4.5. Model 4**

Z důvodu ověření Modelu 3 bylo rozhodnuto přistoupit ke složitějšímu modelu.

V tomto modelu je mostovka modelována pomocí prvků SOLID186. Přesný tvar mostovky, včetně jejího příčného sklonu a půdorysného zakřivení, byl importován z programu AutoCAD 2013. Na mostovku jsou připojeny ocelové I nosníky, vymodelované ze skořepinových prvků SHELL281, přičemž spodní pásnice, stojina a horní pásnice jsou vymodelovány vždy jako jednotlivé dílčí plochy, které jsou následně spojeny v jeden celek tvořící ocelový I nosník. Tyto plochy jsou importovány z AutoCADu.

Při tomto způsobu vytvoření modelu odpadla komplikace, jak s modelováním mostovky, která má nyní přesný tvar dle projektu, tak i s připojením nosníků k mostovce, protože spojení mezi jednotlivými nosnými prvky je nyní zprostředkováno společnými uzly.

Při prvním zatížení tohoto modelu se vyskytl problém v deformaci I nosníků (viz. Obr. 25), kdy se nosníky začaly deformovat jednostranně.

Obr. 25 - Řez body 1 a 2, napětí  $\sigma_x$ , špatná deformace nosníků

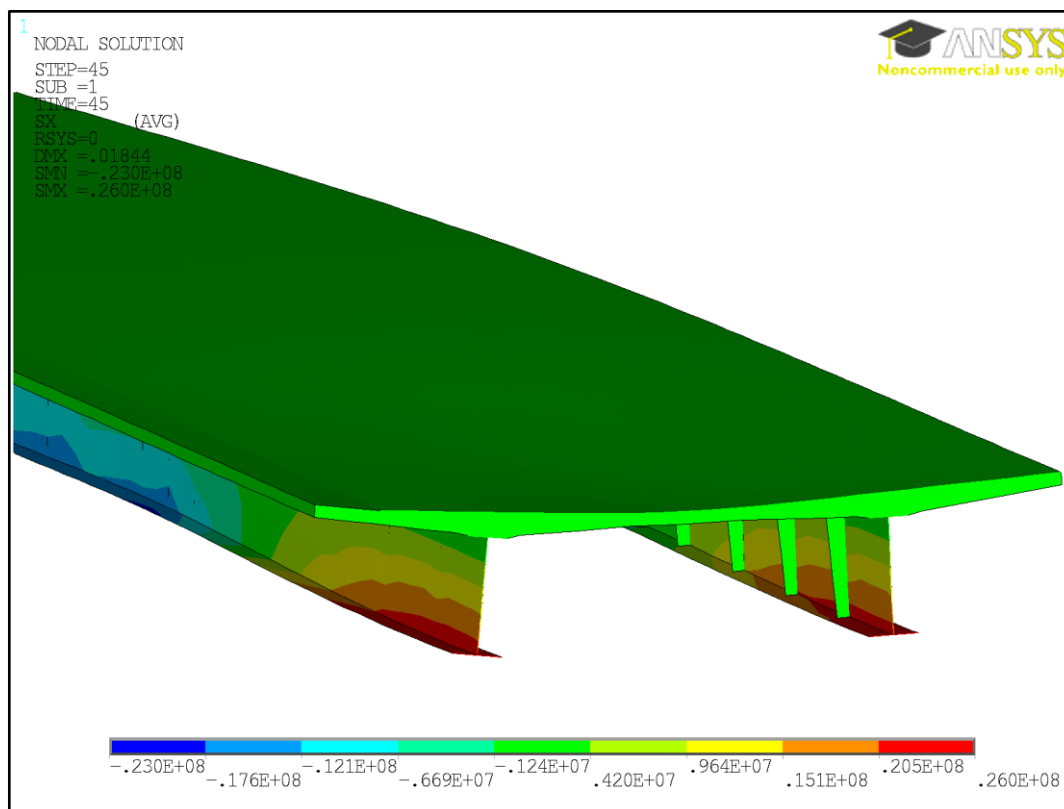
## Výsledky

**Tabulka 5 – Výsledky Modelu A4 bez příčných výztuh**

Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Vypočítané deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	14.95	19.65	<b>31.48</b>
2	13.49	10.60	<b>-21.39</b>
3	0.73	0.89	<b>21.75</b>
4	4.01	7.35	<b>83.29</b>
6	4.06	3.05	<b>-24.93</b>

Příčinou této chyby bylo nevymodelování jednostranných příčných výztuh dle projektu. Tyto výztuhy nebyly vymodelovány dříve, protože jim nebyla přisuzována důležitost. Po přidání těchto výztuh (jež jsou umístěny po vnitřní straně nosníků ve vzdálenosti po 4 m a sahají do vzdálenosti 0,18 m od kraje spodní pásnice) se již nosníky deformovaly korektním způsobem.





Obr. 26 - Deformace po přidání příčných výztuh

## Výsledky

**Tabulka 6 – Výsledky Modelu A4 s příčnými výztuhami**

Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Vypočítané deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	14.95	15.99	<b>6.99</b>
2	13.49	14.46	<b>7.23</b>
3	0.73	0.73	<b>-0.14</b>
4	4.01	4.70	<b>17.21</b>
6	4.06	4.39	<b>8.05</b>

Tento výsledek je velmi uspokojivý, a proto pouze pro zajímavost byl vytvořen model se spolupůsobící vozovkou. Vozovka byla uvažována jako tuze připojená skořepina na horní straně mostovky.

Vozovka sestává ze 4 vrstev:	AKM I	40 mm
	ABVH I	60 mm
	LAS IV	35 mm
	izolační vrstva	5 mm
celkem		140mm

Materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev byly převzaty z Dodatku TP 170 [10].

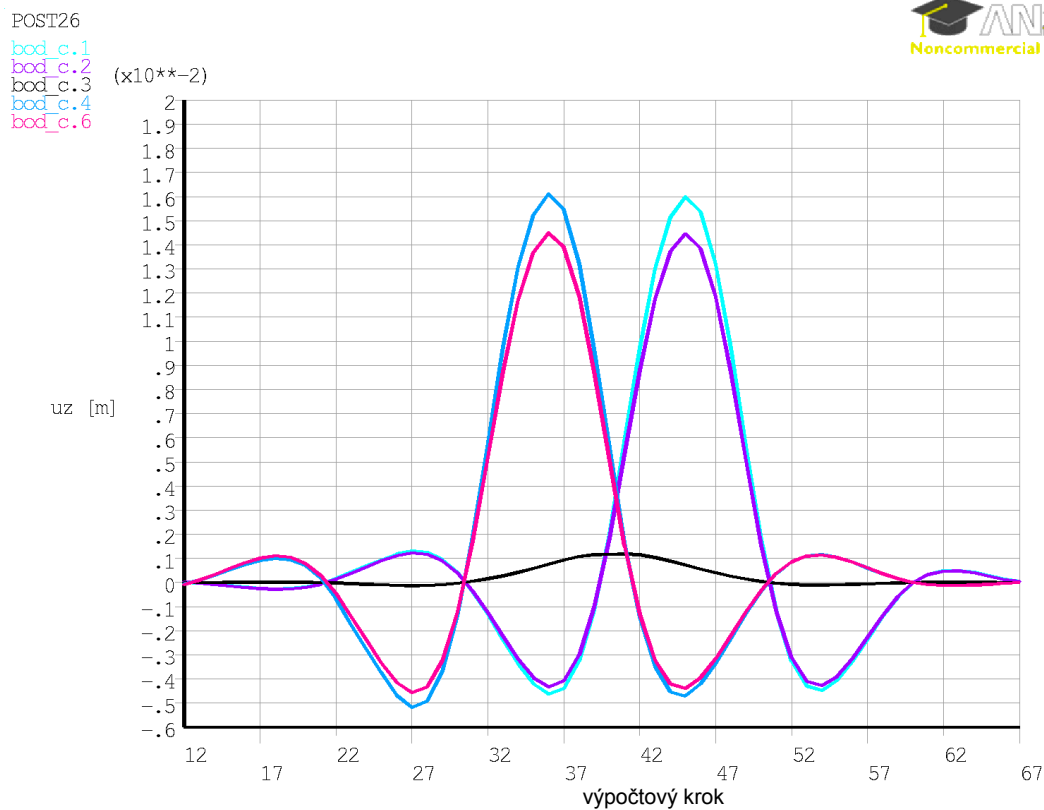
Vysvětlení značení vrstev vozovky je uvedeno v příloze 3.

## Výsledky

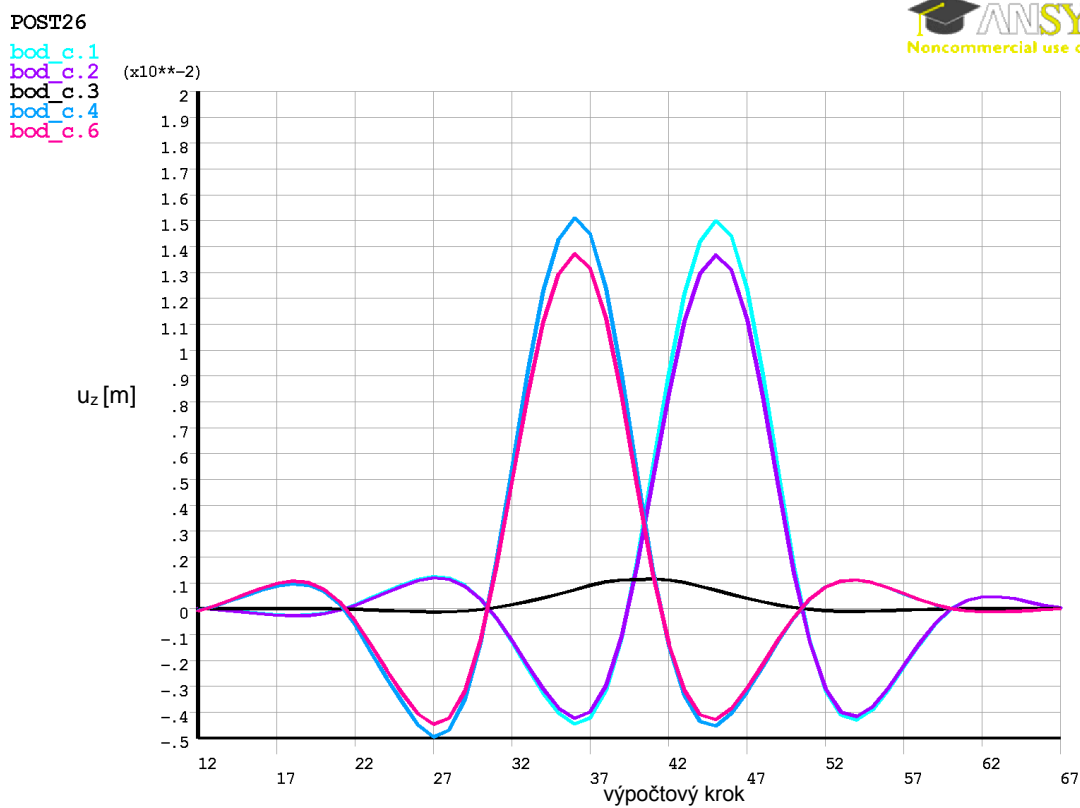
**Tabulka 7 - Výsledky modelu A4 se spolupůsobením vozovky**

Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Vypočítané deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	14.95	15.00	<b>0.37</b>
2	13.49	13.68	<b>1.45</b>
3	0.73	0.71	<b>-2.32</b>
4	4.01	4.53	<b>12.94</b>
6	4.06	4.29	<b>5.51</b>

Tento postup nás ještě více přiblížil k naměřeným hodnotám, zadávání vozovky je však velmi nepřesné, pro veliký rozptyl materiálových vlastností každé vrstvy. Tyto vlastnosti nelze určit přesně ani dle projektu, takže by měly být určeny laboratorně. To stejné platí i pro zadávání materiálových vlastností betonu a do modelu byly brány tabulkové hodnoty dle Eurokódu.



Graf 2 - Svislé posuvy při přejezdu pro model bez vozovky

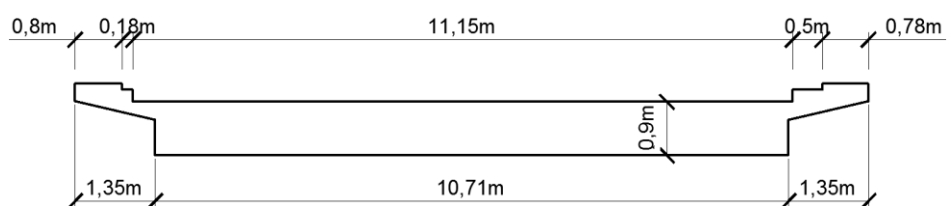


Graf 3 - Svislé posuvy při přejezdu pro model s vozovkou

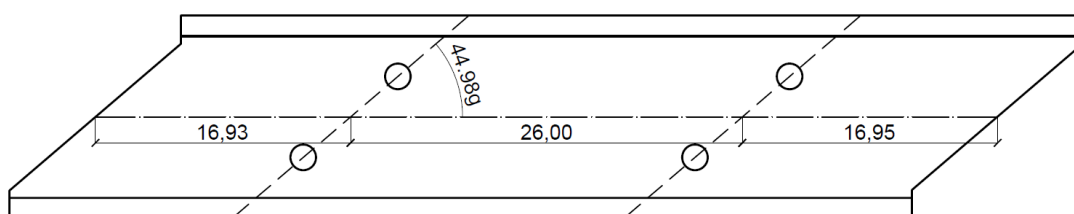
## 5. MOST B

### 5.1. Popis druhého mostu

Druhou modelovanou konstrukcí je dálniční most na dálnici D1 ve směru z Brna do Prahy. Nosnou konstrukci tvoří spojitá šikmá deska s šikmostí 44,98 g o 3 polích s rozpětím 16,25 + 26,00 + 16,25 m; kolmá světlost středního pole činí 15,75 m. Celková délka mostu je 59,86 m. Monolitická spojitá šikmá deska ze železobetonu B330 je o třech polích a je uložena na stranách na opěrách. Vnitřní podpory mostu tvoří vždy dvojice sloupů o průměru 1,10 m s hlavami rozšířenými na průměr 1,70 m v délce 1,50 m. Kolmá šířka desky je 10,71 m, přičemž jsou oboustranně vyloženy římsové konzoly o šířce 1,35 m. Tento most převádí komunikaci pouze v jednom směru.



Obr. 27 - Příčný řez Mostem B



Obr. 28 - Půdorys Mostu B

## 5.2. Specifikace nadměrného nákladu

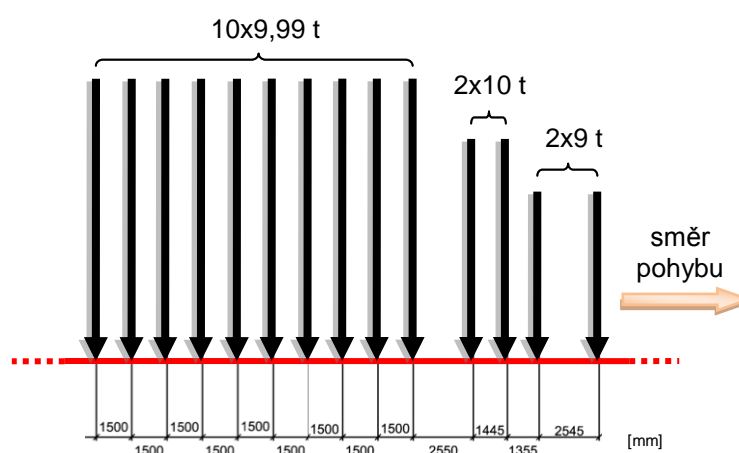
Nadměrným nákladem je náklad o hmotnosti 90,76 tun, který byl převážen na podvozku Goldhofer (34,40 tun), za pomoci tahače Man (12,84 tun) bez postrku. Trasa vedla po dálnici D1 ze směru Brno ve směru na Prahu. Přeprava se uskutečnila na jaře roku 2013.

Souhrn:

Náklad:	90,76 t
Podvozek:	34,40 t
Tahač:	12,84 t
<hr/>	
Celkem:	138,00 t

Souprava:

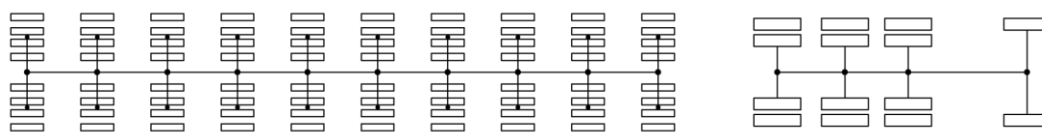
- zatížení jednotlivých náprav [t]:  
 $9,0 + 9,0 + 10,0 + 10,0 + 10 \times 9,99$
- rozvor náprav [m]:  
 $2,545 - 1,355 - 1,445 - 2,550 - 9 \times 1,500$





Obr. 29 - Fotodokumentace přejezdu přes Most B

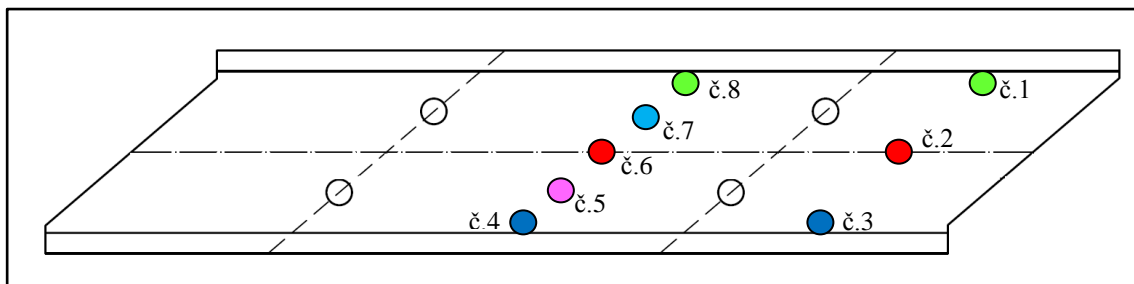
Poznámka: Na Obr. 29 jde vidět zvednutá 7. náprava podvozku. Protože se nepodařilo zjistit přesnější informace o tomto stavu, nebude na něj při modelování brán zřetel.



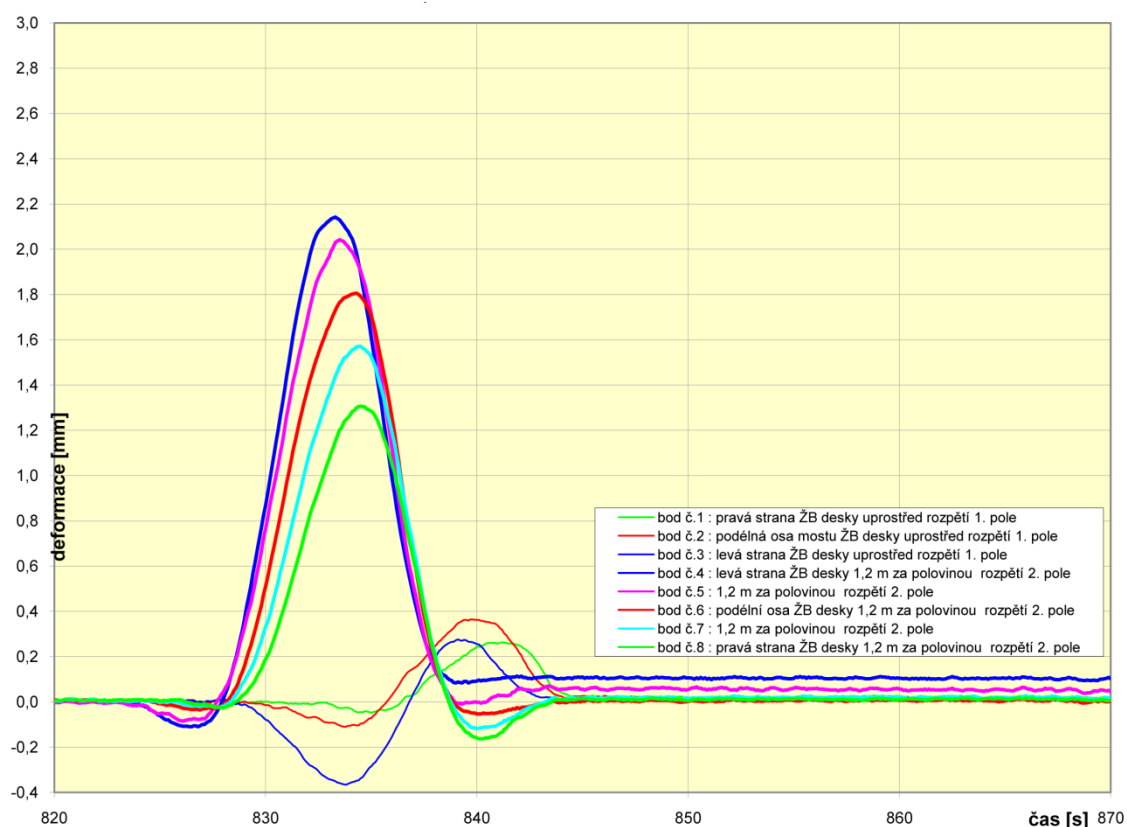
Obr. 30 - Schéma zatížení v půdorysu

### 5.3. Výsledky měření

Měření bylo provedeno ve 2. poli ve vzdálenosti 1,20 m od středu pole, a to z důvodu zachování průjezdnosti přemostěné komunikace v průběhu měření. Měření proběhlo také v polovině rozpětí 3. pole.



Obr. 31 - Schéma měřených bodů



Graf 4 - Výsledky měření Mostu B

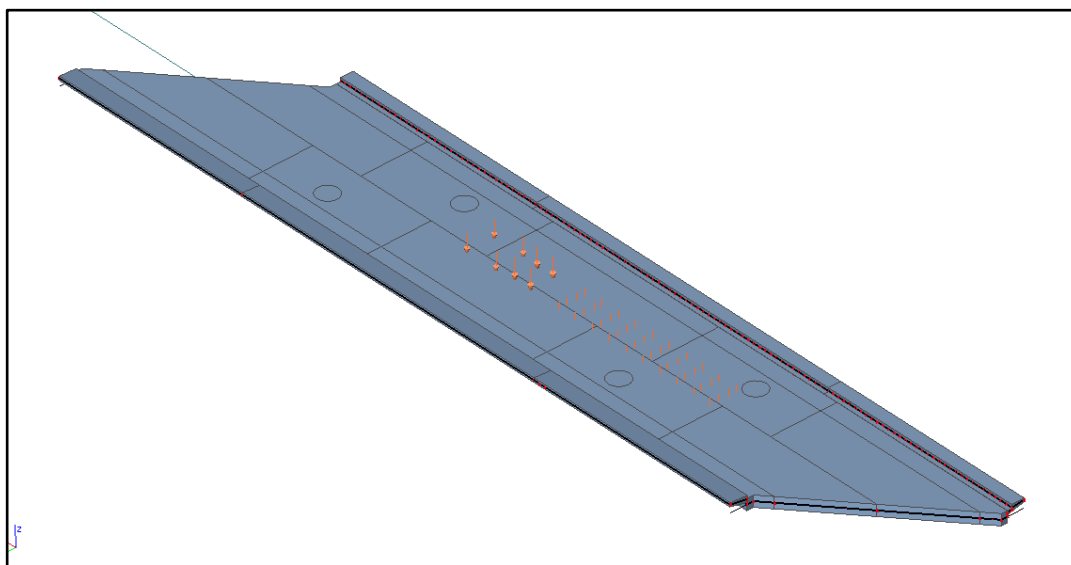
## 5.4. Modelování mostu B a výpočtové hodnoty

Model konstrukce byl proveden v programu Scia Engineer 2012.0. S ohledem na závislost polohy zatížení pro vyvození lokálních maxim bude použito více výpočtových kroků. Model desky bude zjednodušeně modelován jako ortotropní deska a to s ohledem na polohu a množství betonářské výztuže dle projektové dokumentace.

### 5.4.1. Model 1

Pro jednoduchost zadávání geometrie, okrajových podmínek a zatížení byl použit program Scia Engineer 2012.0. Deska i římsy byly vloženy jako střednice a případné excentrické části byly spojeny s přilehlými částmi pomocí tuhých ramen.

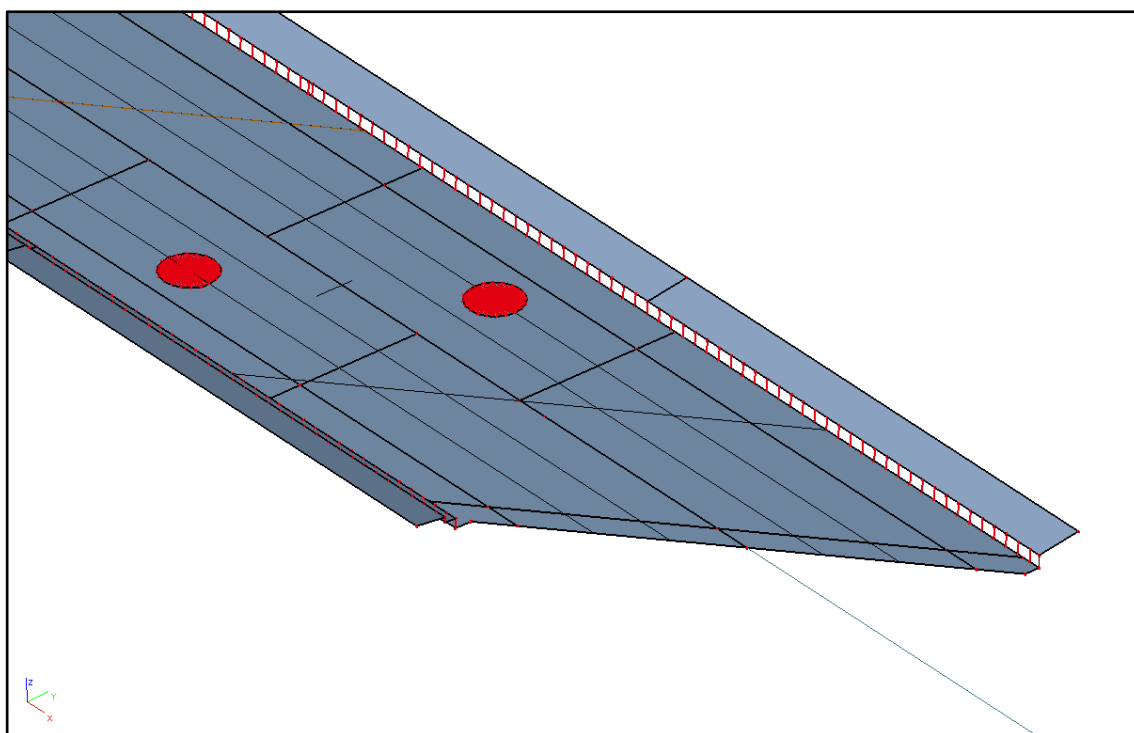
Jako výstup z programu byly zvoleny deformace  $u_z$  v měřených bodech 2. a 3. pole.



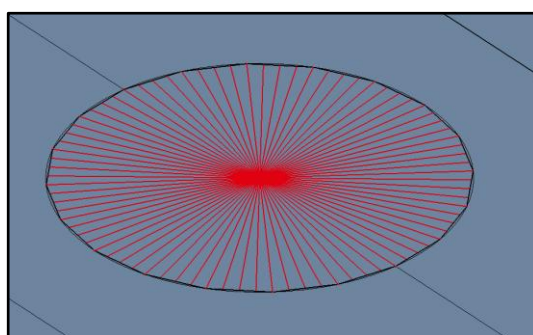
Obr. 32 - Pohled na Model B1 s rozdělením desky na dílčí části

Na Obr. 32 je naznačeno rozdělení konstrukce na části s různými ortotropními vlastnostmi. Okrajové podmínky byly zadány na krajích dle projektu. U sloupových podpěr je uvažována kruhová plocha v hlavě sloupu jako dokonale tuhá, připevněná ke střednici v ose sloupu (viz. kruhové oblasti na Obr. 32). Do jejich středu byla vložena podpora s ručně dopočítanými tuhostmi pro  $rot_x$ ,  $rot_y$ ; všechny ostatní stupně volnosti byly přisouzeny jako nulové.

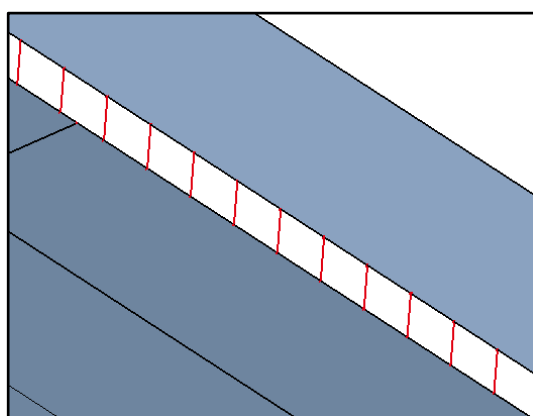




Obr. 33 - Deska s vyobrazením polohy tuhých ramen



Obr. 34 - Detail připojení sloupu



Obr. 35 - Detail připojení římsy

Sloupy jsou uvažovány jako vetknuté na obou koncích; pro výpočet poddajnosti pro  $\text{rotx}$  a  $\text{roty}$  bylo použito vztahu

$$k = \frac{4 \cdot E \cdot I}{L}, \quad (27)$$

kde je  $E$  modul pružnosti materiálu

$I$  moment setrvačnosti

$L$  délka prvku

Pro výpočet byla použita matice tuhosti ortotropní desky

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ T_x \\ T_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \\ & 0 & & D_{44} & 0 \\ & & & 0 & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{xx} \\ w_{yy} \\ 2w_{xy} \\ w_x + \varphi_y \\ w_y - \varphi_x \end{bmatrix} \quad (28)$$

s těmito členy matice tuhosti  $\mathbf{D}$ :

Ohybové tuhosti:

$$D_{11} = E' \cdot J_{i,x}, \quad (29)$$

$$D_{22} = E' \cdot J_{i,y}. \quad (30)$$

Kontrakční tuhost:

$$D_{12} = D_{21} = \mu \cdot \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}. \quad (31)$$

Torzní tuhost:

$$D_{33} = \frac{1 - \mu}{2} \cdot \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}}. \quad (32)$$

Příčný smyk:

$$D_{44} = \frac{1}{\beta} \cdot G \cdot A_{ix} , \quad (33)$$

$$D_{55} = \frac{1}{\beta} \cdot G \cdot A_{iy} . \quad (34)$$

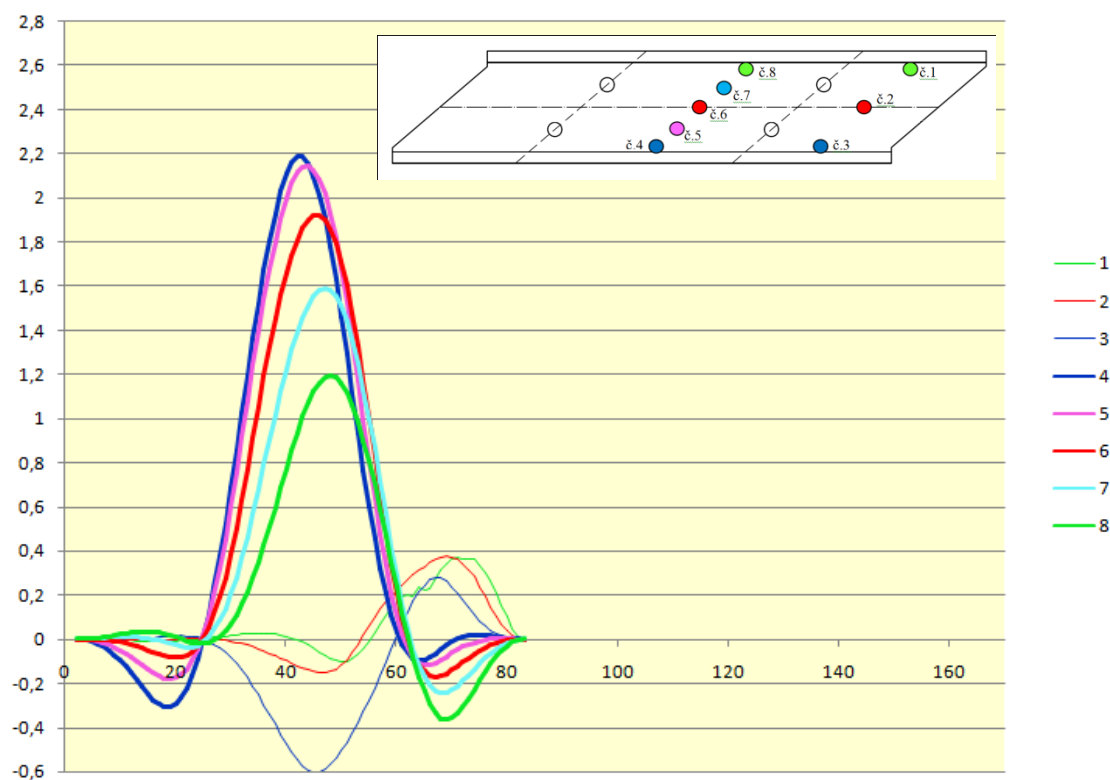
Se vstupními údaji

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2} , \quad (35)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} , \quad (36)$$

kde jsou  $A_{ix}$  a  $A_{iy}$  plochy ideálního průřezu v daném směru,  
 $J_{ix}$  a  $J_{iy}$  momenty setrvačnosti ideálního průřezu,  
 $w_{xx}$ ,  $w_{yy}$  a  $w_{xy}$  2. parciální derivace dle indexů,  
 $w_x$  a  $w_y$  1. parciální derivace dle indexů,  
 $\varphi_x$  a  $\varphi_y$  pootočení dle indexů  
 $\mu = 0,15$  ,  
 $\beta \approx 1$  [11], [4].

## Výsledky



Graf 5 - Výsledky Modelu B1

## Výsledky

Tabulka 8 - Výsledky Modelu B1

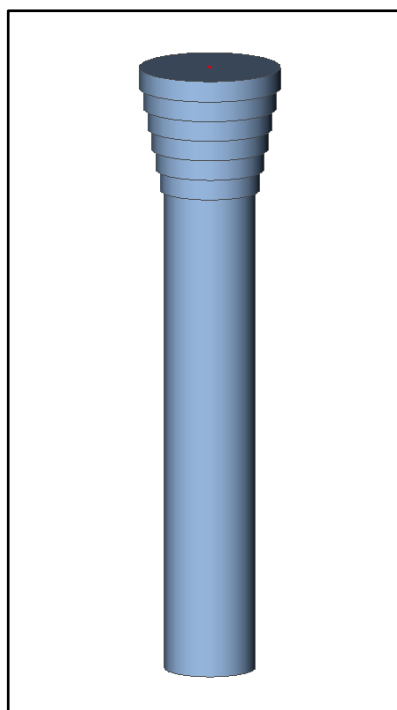
Bod č.	Naměřené deformace uz [mm]	Vypočítané deformace uz [mm]	Rozdíl [%]
1	0.27	0.36	34.81
2	0.36	0.37	3.33
3	0.27	0.28	2.59
4	2.15	2.173	1.07
5	2.04	2.13	4.41
6	1.80	1.91	5.83
7	1.59	1.58	-0.57
8	1.30	1.19	-8.77

Výsledky získané z Modelu 1 jsou relativně přesné a i přes rozdíly ve výsledcích místy až v desítkách procent se jedná o rozdíl pouze v řádech setin milimetru.

Jako kritické místo při sestavování modelu se jeví určení tuhosti ortotropní desky a okrajové podmínky.

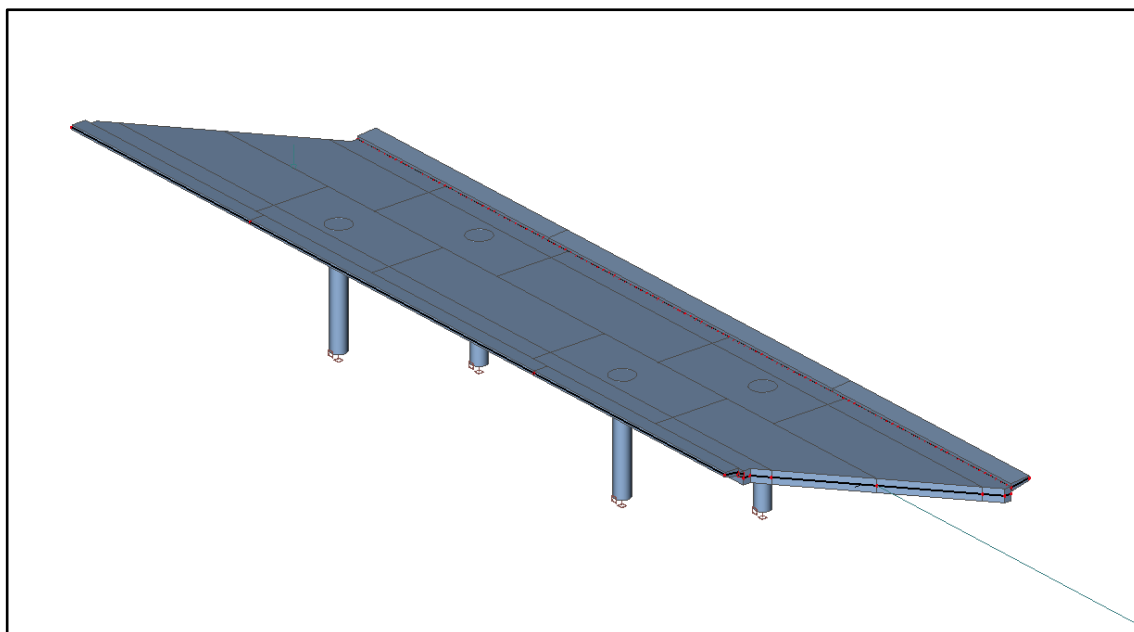
#### 5.4.2. Model 2

V tomto modelu se pokusíme zpřesnit okrajové podmínky. Konkrétně budou upraveny podpory reprezentující sloupy; tyto podpory budou nahrazeny tyčovými prvky reprezentujícími tyto sloupy, náběhy v horní části sloupů budou zjednodušeny odstupňováním průřezu po výšce náběhu (viz. Obr. 36).



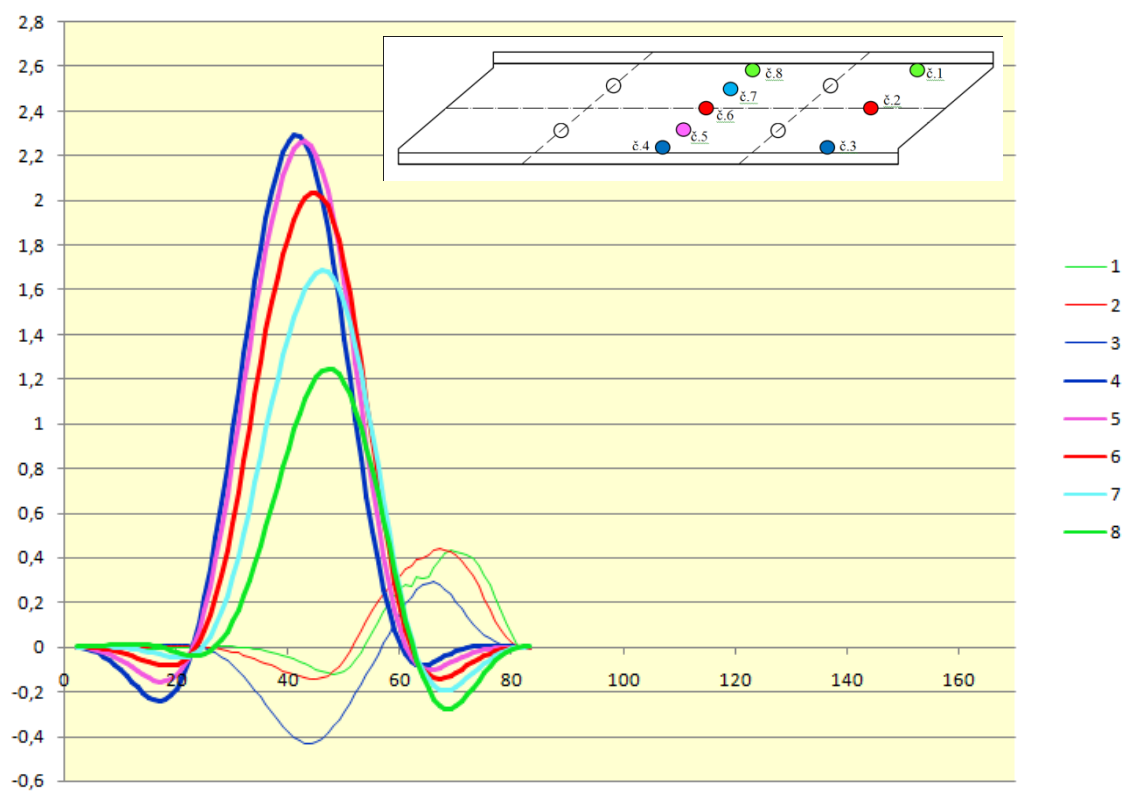
Obr. 36 - Sloupový prvek s odstupňovanou horní částí

Odstupňování je provedeno v 6 krocích po 0,25 m. Tímto způsobem byly vymodelovány všechny sloupy. V dolní části je sloup vetknut do příčného základu, proto podporu sloupu tvoří vetknutí.



Obr. 37 - Pohled na desku se sloupy

## Výsledky



Graf 6 - Výsledný graf Modelu B2

**Výsledky****Tabulka 9 - Výsledky Modelu B2**

<b>Bod č.</b>	<b>Naměřené deformace uz [mm]</b>	<b>Vypočítané deformace uz [mm]</b>	<b>Rozdíl [%]</b>
1	0.27	0.427	<b>58.15</b>
2	0.36	0.438	<b>21.67</b>
3	0.27	0.29	<b>7.41</b>
4	2.15	2.29	<b>6.70</b>
5	2.04	2.264	<b>10.98</b>
6	1.80	2.035	<b>13.06</b>
7	1.59	1.668	<b>4.91</b>
8	1.30	1.247	<b>-4.08</b>

## 6. ZÁVĚR

V práci byla provedena měření hodnot deformací dvou mostních konstrukcí při průjezdu nadměrných nákladů. Naměřené hodnoty byly následně porovnány s hodnotami, vypočtenými na základě sestavených výpočtových modelů obou konstrukcí.

Těžištěm bylo sestavení vhodného odpovídajícího výpočtového modelu zejména u prvního mostu. Od prvního jednoduchého modelu (spojitého nosníku v programu SCIA) až po nejsložitější model se započtením spolupůsobení vozovky v programu ANSYS byly získávány hodnoty deformací a porovnávány s hodnotami naměřenými.

Po porovnání těchto hodnot a zjištění rozdílů pak byly hledány příčiny těchto rozdílů. Zajímavým se ukázalo mimo jiné i vliv polohy zatížení vzhledem k ose mostu a značné rozdíly v deformacích i při poměrně malé excentricitě. Rovněž vliv příčných výztuh ocelových nosníků, které byly v první fázi považovány za nevýznamné, se ukázal v dalším výpočtu jako velmi důležitý.

Na základě zjišťovaných rozdílů, popř. evidentních chyb ve výsledcích, byl model postupně zpřesňován, až bylo dosaženo dostatečné shody s měřenými hodnotami.

Přínosem bylo jednak seznámení se s praktickými metodami měření deformací v terénu, tak i důkladnější se seznámení s programem ANSYS a využití jeho funkcí při modelování konstrukcí.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BATHE, Klaus Jürgen. *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996, 1037 s. ISBN 01-330-1458-4.
- [3] WECK, O. a I. YONG KIM. *Engineering Design and Rapid Prototyping*. (přednáška) Cambridge: MIT, 12.1.2004 Dostupné z:  
<[http://web.mit.edu/16.810/www/16.810\\_L4\\_CAE.pdf](http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf)>
- [2] PETRUŠKA, Jindřich. Vysoké učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles. *Počítačové metody mechaniky II: Metoda konečných prvků*. 2003.
- [5] SALAJKA, Vladislav. Vysoké učení v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. *Stavební mechanika II: Přednášky (skriptum)*
- [4] KOLÁŘ, Vladimír, Jiří KRATOCHVÍL, František LEITNER a Alexander ŽENÍŠEK. Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 372 s.
- [6] SUZA, Igor, Dominik SUZA a Adam MIKULÍK. MOSTNÍ A SILNIČNÍ, s.r.o. *Metody sledování deformací mostů při přejezdech nadměrných břemen*. 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <<http://www.mostni-silnicni.cz/doc/2013-metody-sledovani-deformaci-mostu-pri-prejezdech-nadmernych-bremen.pdf>>
- [7] CHUDÝ, Vladimír, Martin HALAJ a Paul REGTIEN. Katedra automatizácie, informačnej a prístrojovej techniky. *Fyzikálne princípy snímačov*. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z:  
<<http://www.kam.sjf.stuba.sk/katedra/publikacie/leonardo/ucebnica/05s.pdf>>
- [8] HVOZDENSKÝ, P. *Kvantifikace a zvyšování přesnosti měření průhybu mostů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2008, 72 s. z toho přílohy 5 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.
- [9] ANSYS, Inc. *ANSYS 14.0 Help*.

- [10] Dodatek TP 170. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury. *Navrhování vozovek pozemních komunikací: Technické podmínky*, 2010.
- [11] KOLÁŘ, Vladimír. FEM consulting s.r.o. *Fyzikálně a tvarově ortotropní desky: Pokyny k sestavování vstupních dat a mostních, stropních a základových desek s různými průřezy ve dvou vzájemně kolmých směrech*. 1993. [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <[http://www.dlupal.de/download/manual/cz/ortotropni\\_desky.pdf](http://www.dlupal.de/download/manual/cz/ortotropni_desky.pdf)>
- [12] Scia Engineer, *Manuál: Referenční příručka*. (2011). Dostupné z: <[http://www.scia-online.cz/download/Typy\\_a\\_navody/Scia\\_Engineer/Manualy/Manuals\\_2010/Referencni\\_Prirucka\\_csy.pdf](http://www.scia-online.cz/download/Typy_a_navody/Scia_Engineer/Manualy/Manuals_2010/Referencni_Prirucka_csy.pdf)>
- [13] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí* 1. 3. vyd. Praha: ČBS Servis, 316 s. ISBN 978-80-903807-5-2.
- [14] *Statické posouzení nosné konstrukce mostů včetně změřených poklesů podpěr*. SHP TS, s.r.o. (2012) Dostupné z: <[http://www.eurovia.cz/gallery/html/Staticke\\_posouzeni\\_nosne\\_konstrukce\\_most\\_u%281%29.pdf](http://www.eurovia.cz/gallery/html/Staticke_posouzeni_nosne_konstrukce_most_u%281%29.pdf)>
- [15] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce: výukový film*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 186 s. ISBN 978-80-7204-561-7.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Diskretizace soustavy na jednotlivé konečné prvky .....	10
Obr. 2 - Diskretizace prutu [3] .....	12
Obr. 3 - Osově namáhaný prutový prvek [3] .....	12
Obr. 4 - Srovnání numerického a analytického řešení prutu - posun [3] .....	15
Obr. 5 - Srovnání numerického a analytického řešení prutu - napětí [3] .....	15
Obr. 6 - Konstrukční schéma víceotáčkového potenciometru [7] .....	20
Obr. 7 - Trojnožka s potenciometrem [8] .....	20
Obr. 8 - Příčný řez A-A' .....	21
Obr. 9 - Podélný řez Mostem A .....	22
Obr. 10 - Půdorys Mostu A .....	22
Obr. 13 - Fotodokumentace přejezdu .....	24
Obr. 11 - Schéma zatížení v podélném řezu .....	24
Obr. 12 - Schéma zatížení v půdorysu .....	24
Obr. 14 - Body měření v půdorysu .....	25
Obr. 15 - 1D spojitý nosník .....	26
Obr. 16 - Použitý průřez .....	26
Obr. 17 - Poloha zatížení a výsledky Modelu 1 .....	27
Obr. 18 - Prvek MPC184 Rigid Link/Beam [9] .....	31
Obr. 19 - Zadávání nosníků přes osu spodní strany dolní pásnice .....	32
Obr. 20 - Model 2 .....	33
Obr. 21 - Rotace dolní pásnice .....	34
Obr. 22 - Napětí $\sigma_x$ po výšce průřezu v bodech 1 a 2 .....	35
Obr. 23 - Napětí $\sigma_x$ po výšce průřezu v bodech 1 a 2 .....	36
Obr. 24 - Zadávání nosníků přes těžiště .....	36
Obr. 25 - Řez body 1 a 2, napětí $\sigma_x$ , špatná deformace nosníků .....	39
Obr. 26 - Deformace po přidání příčných výztuh .....	40
Obr. 27 - Příčný řez Mostem B .....	43
Obr. 28 - Půdorys Mostu B .....	43
Obr. 29 - Fotodokumentace přejezdu přes Most B .....	45
Obr. 30 - Schéma zatížení v půdorysu .....	45
Obr. 31 - Schéma měřených bodů .....	46
Obr. 32 - Pohled na Model B1 s rozdělením desky na dílčí části .....	47
Obr. 33 - Deska s vyobrazením polohy tuhých ramen .....	48

Obr. 34 - Detail připojení sloupu .....	48
Obr. 35 - Detail připojení římsy .....	48
Obr. 36 - Sloupový prvek s odstupňovanou horní částí .....	52
Obr. 37 - Pohled na desku se sloupy .....	53
Obr. 38 - Model pro ověření smykové únosnosti.....	74

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Popis rovnic (3) a (4) [3].....	12
Tabulka 2 – Výsledky Modelu A1 .....	27
Tabulka 3 – Výsledky Modelu A2 .....	34
Tabulka 4 – Výsledky Modelu A3 .....	37
Tabulka 5 – Výsledky Modelu A4 bez příčných výztuh .....	39
Tabulka 6 – Výsledky Modelu A4 s příčnými výztuhami.....	40
Tabulka 7 - Výsledky modelu A4 se spolupůsobením vozovky .....	41
Tabulka 8 - Výsledky Modelu B1 .....	51
Tabulka 9 - Výsledky Modelu B2 .....	54

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 3 - Výsledky měření na Mostu A.....	25
Graf 2 - Svislé posuvy při přejezdu pro model bez vozovky .....	42
Graf 3 - Svislé posuvy při přejezdu pro model s vozovkou .....	42
Graf 4 - Výsledky měření Mostu B.....	46
Graf 5 - Výsledky Modelu B1 .....	51
Graf 6 - Výsledný graf Modelu B2 .....	53

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 - VÝPOČET ORTOTROPNÍ DESKY MOSTU B.....	61
PŘÍLOHA 2 - VÝPOČET PODDAJNOSTI PODPOR MOSTU B .....	72
PŘÍLOHA 3 - VSTUPNÍ PARAMETRY MOSTU A.....	73
PŘÍLOHA 4 - VÝPOČET ÚNOSNOSTI .....	74

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

<b>MKP</b>	metoda konečných prvků
<b><math>\Pi</math></b>	potenciální energie
<b>W</b>	energie napjatosti tělesa
<b>P</b>	energie vnějšího zatížení
<b>K</b>	matice tuhosti
<b>u</b>	vektor posunutí
<b>F</b>	vektor zatížení
<b>U</b>	celková energie
<b>P</b>	polynom
<b>S</b>	matice souřadnic
<b>a</b>	vektor koeficientů
<b><math>\mu</math></b>	součinitel příčné kontrakce
<b><math>\sigma</math></b>	napětí
<b><math>\varepsilon</math></b>	poměrné přetvoření
<b>w</b>	průhyb desky
<b>E</b>	modul pružnosti materiálu
<b>E'</b>	modul pružnosti s vlivem příčné kontrakce a dilatace
<b>G</b>	smykový modul pružnosti
<b><math>\beta</math></b>	opravný součinitel
<b>S,A</b>	plocha
<b>d, <math>\phi</math></b>	průměr výztuže
<b>d<sub>h</sub>, d<sub>d</sub></b>	vzdálenost výztuže od horního/dolního povrchu
<b><math>\alpha_c</math></b>	poměr modulů pružnosti oceli a betonu
<b>I,J</b>	moment setrvačnosti průřezu
<b>T,V</b>	posouvající síla
<b>M</b>	moment